

УДК 535.361:621.373.826
DOI: 10.15587/2706-5448.2020.210308

РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ ГОРОДСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ

Титарь В. П., Шпаченко О. В., Панимарчук О. И., Гузенко М. Ф., Кошман С. В., Луцкий С. В.

Объектом исследования являются методы дистанционного экологического мониторинга приземного слоя атмосферы в пределах жилых кварталов и промышленных зон крупных мегаполисов. Для дистанционного определения количественных характеристик газовых и аэрозольных загрязнений воздуха с высокой точностью и пространственным разрешением предложен мобильный лазерный комплекс. Определение состава и концентрации газовых загрязнений выполняется с помощью двух методов – метода дифференциального поглощения и метода спонтанного комбинационного рассеяния (СКР). Метод дифференциального поглощения применяется для обнаружения малых концентраций загрязняющих газов вдоль стационарной трассы зондирования. Метод спонтанного комбинационного рассеяния использован для дистанционного обнаружения вредных газообразных веществ при их концентрациях, превышающих предельно допустимые нормы. Метод СКР, применяемый в разработанном газоаэрозольном лидаре, позволяет получать трёхмерные распределения концентраций определяемых газов с разрешением порядка одного метра. Это даёт возможность оперативно и с большой точностью выявлять экологически опасные источники загрязнения воздушной среды и обоснованно применять штрафные санкции к нарушителям экологических норм. Дистанционный анализ аэрозольного состава приземного слоя атмосферы производится с помощью методов лидарной голографии, которые разработаны в лаборатории радио- и оптической голографии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (Украина). Различие в отражении от жидких и твёрдых аэрозольных частиц делает возможным формирование поляризационных голограмм и рассмотрение по ним жидких и твёрдых аэрозолей отдельно. Количественный анализ состава и концентрации частиц, наблюдаемых по их голографическим изображениям, характеризуется высоким уровнем чувствительности, поскольку, в отличие от других известных методов, не требует априорных предположений о качественном составе определяемого аэрозоля. Таким образом, за счёт использования различных физических принципов взаимодействия лазерного излучения с газовыми и аэрозольными компонентами воздушной среды, разработанный лазерный комплекс для экологического мониторинга атмосферы является эффективным средством контроля за состоянием воздуха в условиях современных мегаполисов.

Ключевые слова: *лазерное зондирование атмосферы, дифференциальное поглощение, спонтанное комбинационное рассеяние, газоаэрозольный голографический лидар.*

1. Введение

Широкое использование ископаемых топлив, таких как нефть, уголь, газ в промышленности, транспорте и в быту приводит к выбросу в атмосферу все возрастающего количества газообразных и аэрозольных загрязняющих веществ. Эти вещества влияют на естественные физические и химические процессы в природе, жизнь животных и, особенно, людей. Человечество ощущает пагубное воздействие загрязнения атмосферы в виде выпадения кислотных дождей, осаждения токсичных отходов производств, появления в промышленных районах фотохимического смога.

Проблема экологического состояния атмосферы в промышленных центрах существенно усугубилась в связи со сплошной автомобилизацией, произошедшей в европейских государствах. Автомобильный транспорт относится к наиболее опасным источникам загрязнения атмосферного воздуха. Сегодня выбросы автотранспорта преобладают над выбросами стационарных источников, соотносясь как 60:40 % и более.

При традиционном мониторинге остаются «бесконтрольными» десятки загрязняющих веществ, в том числе такие опасные, как полициклические ароматические углеводороды ПАУ (бензол, бензпирен, толуол и т. п.), формальдегиды, хлорсодержащие вещества, озон (особая токсичность которого в присутствии оксидов азота возрастает в 20 раз). Особо опасные токсичные вещества образуются в атмосфере также во вторичных реакциях при химическом взаимодействии выброшенных загрязняющих веществ из техногенных источников под воздействием солнечной радиации (процессы трансформации).

В связи с постоянно возрастающим техногенным загрязнением биосферы Земли большую актуальность приобретает разработка и внедрение в практику новейших методов экологического мониторинга.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются методы дистанционного экологического мониторинга приземного слоя атмосферы в пределах жилых кварталов и промышленных зон крупных мегаполисов.

Наиболее полно современным требованиям оперативности получения информации о состоянии атмосферы отвечают лазерные методы зондирования, способные обеспечить дистанционный контроль заданного участка воздушного пространства в реальном времени. С этой целью в лаборатории радио- и оптической голографии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (Украина) разработан лазерный комплекс для экологического мониторинга состояния атмосферы в крупных промышленных центрах. Комплекс состоит из двух подвижных установок. Одна из установок представляет собой лазерный газоанализатор дифференциального поглощения (ЛГДП), предназначенный для определения интегральной концентрации

основных газовых загрязнителей вдоль выбранных стационарных трасс. Вторая подвижная установка представляет собой газоаэрозольный голографический лидар (ГГЛ), один из каналов которого позволяет определять концентрацию широкого спектра атмосферных газов методом спонтанного комбинационного рассеяния (СКР), а второй канал предназначен для определения типа и концентрации аэрозолей голографическими методами.

Предлагаемый в работе лазерный комплекс позволяет осуществлять комплексный экологический контроль атмосферы в зоне жилой городской застройки и в санитарно-защитной зоне предприятий по фактическому ее состоянию в сочетании с точным учетом состава и мощности выбросов техногенных источников. С помощью предложенного лазерного комплекса можно получать достоверную оценку и прогноз вероятного развития техногенной ситуации на стадии критических параметров загрязнений для принятия профилактических мер с целью предотвращения экологических бедствий.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка принципиальных схем для технической реализации выбранных оптимальных методов лазерного зондирования и в комплексе мер по экологическому мониторингу приземного слоя атмосферы городских и промышленных районов.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Обосновать выбор физических принципов взаимодействия лазерного излучения с компонентами атмосферы, которые будут оптимальными для определения уровня концентрации загрязняющих веществ в различных зонах городских районов с учётом близости промышленных объектов.

2. Оценить эффективность использования разрабатываемых схем путём компьютерного моделирования процесса обнаружения наиболее распространённых загрязняющих газов при зондировании атмосферы лазерными импульсами.

3. Описать основные принципы метрологического обеспечения системы обработки информации в создаваемом лазерном комплексе для экологического мониторинга приземного слоя атмосферы.

4. Исследование существующих решений проблемы

Вопросам дистанционного лазерного зондирования атмосферы в целях определения её отдельных компонент посвящено достаточно много работ. Так, важность проблемы контроля за состоянием окружающей среды и применение лазеров в целях дистанционного экологического контроля за состоянием атмосферы отражены в [1]. А в [2] отмечается, что существует множество методов, позволяющих обнаруживать загрязняющие вещества: инфракрасная спектроскопия, электрохимия, газовая хроматография и т. п. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Подчёркивается, что методы лазерного зондирования (лидарные методы) являются дистанционными и не требуют отбора химических проб для проведения анализов, что во многих случаях является существенным преимуществом.

В работе [3] изложена краткая история развития лидаров (англ. lidar – «light detection and ranging» – «обнаружение и определение дальности с помощью света») и их применения в атмосферных исследованиях. Подчеркивается, что с каждым годом лидарные системы становятся всё более совершенными, так что в настоящее время стало возможным их широкое использование на практике для мониторинга загрязнений.

При лазерном зондировании в основном используются следующие эффекты взаимодействия световой волны со средой: аэрозольное и молекулярное рассеяние, флуоресценция, спонтанное комбинационное (рамановское) рассеяние, а также резонансное поглощение [3, 4].

В [5] дан обзор существующих лидаров дифференциального поглощения. Отмечено, что в основном метод дифференциального поглощения применяется в наземных и бортовых лидарах для измерения концентрации тропосферного и стратосферного озона и тропосферного водяного пара. Сообщается, что начаты работы по созданию лидара дифференциального поглощения для интегральных высокоточных измерений CO_2 и CH_4 вдоль трассы зондирования.

В [6] дана информация о предварительных испытаниях лидара дифференциального поглощения, базирующегося на борту исследовательского самолёта. Лидар предназначен для определения интегральной концентрации вдоль трассы зондирования таких парниковых газов, как CO_2 и CH_4 .

В работах [7, 8] сообщается о создании двухлидарных систем наземного базирования, основанных на методе дифференциального поглощения. Созданная авторами лазерная система IPDA (integrated path differential absorption) позволяет измерять малые концентрации CO_2 , CH_4 и H_2O , усреднённые по трассе зондирования. При этом для получения информации о концентрации исследуемых веществ используется лазерное излучение, отражённое в обратном направлении от топографических объектов, и применяется перестраиваемый лазер непрерывного действия. В созданной лазерной системе DIAL (Differential absorption lidar) используется импульсный лазер и применяется методика стробирования по дальности. В системе DIAL в качестве распределённого в пространстве отражателя используется атмосферный аэрозоль. DIAL лидар предназначен для определения распределения концентрации CO_2 и H_2O с разрешением по дальности порядка 250 м.

В [7] изложены результаты испытаний созданного IPDA лидара дифференциального поглощения наземного базирования для измерения средней вдоль трассы зондирования концентрации CO_2 , CH_4 и H_2O . Испытания проводились в ночное время на трассе длиной 2,75 км. В качестве отражателя использовалась поверхность скалы. Испытания показали, что точность измерений концентрации CO_2 и CH_4 в сухом воздухе за период измерения 30 с составляет 4 мкмоль/моль и 50 нмоль/моль, соответственно.

Работа [8] посвящена испытаниям созданного DIAL лидара. Были проведены одновременные измерения концентрации CO_2 и H_2O при помощи DIAL и IPDA лидаров, а также установленного в точке на трассе зондирования специального контактного датчика CO_2 и H_2O . Контактный датчик был предварительно откалиброван в соответствии со стандартами Всемирной Метеорологической

Организации (WMO – World Meteorological Organization). Эксперименты показали, что данные, полученные DIAL лидаром, согласуются с результатами IPDA и контактного датчика с точностью до измерительных погрешностей.

В [4] приведены результаты предварительных испытаний малогабаритного прототипа бортового сканирующего рамановского лидара, предназначенного для выявления утечек из газо- и нефтепроводов. Испытания проводились в реальных условиях трансконтинентального газопровода и показали хорошие результаты. Разработанная лазерная система способна обеспечить обнаружение метана на уровне концентрации в 6 ppm (ppm – от англ. «parts per million» – «частей на миллион») и концентрации сульфида водорода на уровне 2 ppm.

В [9] сообщается о создании двух типов компактных рамановских лидаров для обнаружения утечек водорода. Испытания показали, что рамановский мини-лидар на основе лазера с диодной накачкой позволяет обнаруживать концентрации газообразного водорода на уровне 1 % в диапазоне расстояний 0–50 м при работе в режиме накопления в течение 30 с. Рамановский мини-лидар на основе светодиодов позволяет обнаруживать однопроцентную концентрацию водорода на расстояниях 0–20 м при работе в режиме накопления в течение 3,5 мин.

Работы [10, 11] посвящены созданию рамановского (СКР) лидара для дистанционного зондирования утечки CO₂. Проведенные полевые измерения показали эффективность обнаружения CO₂ на расстоянии в 0,2 км от места установки лидара и хорошую согласованность получаемых данных с данными, измеренными с помощью приборов на месте.

В работе [2] представлены результаты предварительных экспериментов по созданию приёмного канала гиперспектрального рамановского (СКР) лидара для геоэкологического мониторинга. Использованная авторами схема с применением ПЗС-матрицы (сокр. от «прибор с зарядовой связью») позволит достичь высокой чувствительности и селективности с возможностью регистрации спектра более 100 определяемых химических веществ в режиме онлайн. В то же время в [2] отмечается, что полученные результаты являются предварительными, и для успешной разработки предложенной технологии требуются дальнейшие исследования.

Наряду с газовыми загрязнителями, при изучении экологического состояния атмосферы необходимо учитывать наличие в ней аэрозольных частиц природного и антропогенного происхождения. В историческом плане зондирование атмосферы при помощи лазеров применялось прежде всего для исследования не газового состава, а аэрозольной составляющей, например, для изучения прозрачности атмосферы или высоты облаков [3].

Следует отметить, что интерпретация результатов лазерного зондирования аэрозолей оказывается сложнее, чем в случае зондирования газовой составляющей. Лидарное уравнение для аэрозоля неопределенно, поскольку содержит две неизвестные функции – прозрачность зондируемого участка воздушной среды и коэффициент ослабления [12]. Поэтому решение лидарного уравнения для аэрозоля становится возможным лишь при введении некоторой априорной информации об исследуемом аэрозоле, а также при расширении

измерительной информации. Так, например, в [13] рассмотрены новые методики изучения облачных сред с использованием угловых свойств интенсивности многократного рассеяния и поляризационных характеристик лидарных сигналов, отражённых от аэрозольных частиц. Авторами представлен новый теоретический подход с целью разработки и создания лидаров для определения микрофизических параметров стратосферного аэрозоля. Однако исследование угловых свойств интенсивности отражённого сигнала неприменимо в моностатических лидарных системах, в которых излучатель и приёмный телескоп располагаются на одной платформе.

В [14] отмечается, что зондирование на нескольких длинах волн позволяет получать информацию не только о спектральной зависимости коэффициентов рассеяния аэрозоля, но и о микрофизических параметрах частиц. В работе проведена теоретическая оценка параметров многоволнового лидара для мониторинга аэрозоля в высотном диапазоне 1–10 км. Следует, однако, отметить, что применение зондирования на нескольких частотах позволяет определить параметры микроструктуры аэрозоля лишь при условии, что аэрозоль состоит из изотропных диэлектрических сфер. Предположение о сферичности и изотропности не выполняется для пылевых структур и индустриального аэрозоля. Для несферических частиц интерпретация лидарных измерений требует введения дополнительных допущений, основанных на информации о параметрах формы рассеивающих частиц. Поэтому многочастотное зондирование также не гарантирует исключения больших погрешностей при определении счётной и массовой концентрации аэрозоля.

Анализ проведенного обзора литературных данных позволяет сделать следующие выводы. Дистанционное лазерное зондирование атмосферы является очень перспективным методом экологического контроля. Однако существующие в настоящее время лидарные системы нацелены на решение конкретных прикладных задач и поэтому позволяют определять крайне ограниченное количество загрязняющих газов. Дистанционное лазерное исследование аэрозолей, несмотря на применение различных методов, не позволяет однозначно решить уравнение лидарного зондирования, что приводит к возникновению больших погрешностей в интерпретации получаемых данных. Кроме того, в доступных литературных источниках отсутствует информация о разработке лазерных систем для дистанционного зондирования приземного слоя атмосферы, которые позволяли бы комплексно решить проблему определения как аэрозольных, так и газовых загрязнений. Поэтому разработка лазерного комплекса для экологического мониторинга атмосферы с применением различных физических методов дистанционного газоанализа в сочетании с принципиально новыми методами лидарной голографии для исследования аэрозолей является перспективной задачей.

5. Методы исследования

5.1. Лазерный газоанализатор дифференциального поглощения (ЛГДП)

Метод дифференциального поглощения, который применён в разработанном ЛГДП, основан на поглощении световой энергии молекулами

исследуемого газа при совпадении частоты излучения лазера с частотой электронного или колебательно-вращательного перехода данных молекул. Для технической реализации этого метода необходимо осуществлять зондирование на двух частотах, одна из которых точно совпадает с резонансной частотой исследуемых молекул, а вторая – несколько от неё отличается (обычно разница длин волн составляет около 15 нм). Это необходимо для учёта влияния на результаты измерения аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения посторонними веществами [15]. Метод оказывается эффективным в том случае, когда применяется режим временного накопления и определяется средняя концентрация исследуемого газа вдоль стационарной трассы, на одном конце которой располагается зондирующий лазер, а на другом – приёмное устройство. Если приёмник и излучатель располагаются рядом, то на другом конце трассы помещается отражатель.

При зондировании атмосферы на двух частотах, одна из которых (ν_1) лежит на линии поглощения, а другая (ν_2) вне её, среднюю концентрацию газа \bar{N} на трассе длиной z можно определить по формуле [16]:

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

где K – аппаратная константа, обусловленная различиями в энергии лазеров, пропускании фильтров и т. п. на частотах ν_1 и ν_2 ; J_{ν_1} и J_{ν_2} – интенсивности принятого излучения на двух используемых частотах после прохождения зондирующего импульса через исследуемый слой атмосферы; σ_{ν_1} и σ_{ν_2} – поперечные сечения поглощения на частотах ν_1 и ν_2 .

Для исследования приземного слоя атмосферы метод дифференциального поглощения эффективен при определении средних концентраций газов вдоль стационарной трассы, когда необходимо обнаружить наличие очень малых концентраций исследуемого газа, но при этом нет необходимости определять локализацию источников загрязнения. Данный метод может быть эффективно применён для экологического мониторинга атмосферы в городских районах, достаточно удалённых от производственной зоны промышленных предприятий.

Принципиальная блок-схема разработанного ЛГДП представлена на рис. 1. Линии поглощения большинства загрязняющих атмосферу газов располагаются в среднем инфракрасном диапазоне. Поэтому в качестве источника зондирующего излучения был выбран параметрический генератор света (ПГС) на кристалле CdSe с накачкой лазером на Er:YAG, который обеспечивает плавную перестройку длин волн излучения в диапазоне 2,8–4,2 мкм. На рис. 1 блок питания с лазером накачки Er:YAG и перестраиваемый лазер (ПГС) CdSe обозначены цифрами 1 и 2, соответственно.

Применение перестраиваемого лазера позволяет настраиваться на линии поглощения различных загрязняющих газов, благодаря чему количество определяемых газов в разработанном ЛГДП конструктивно ничем не ограничено. Однако процесс настройки ПГС на различные длины волн

занимает определённое время, в течение которого может определённым образом измениться аэрозольный и газовый состав атмосферы. Поэтому для «одномоментного» получения зондирующих импульсов на двух частотах ν_1 и ν_2 (формула (1)) дополнительно применяется частотная модуляция, осуществляемая блоком модуляции частоты 3.

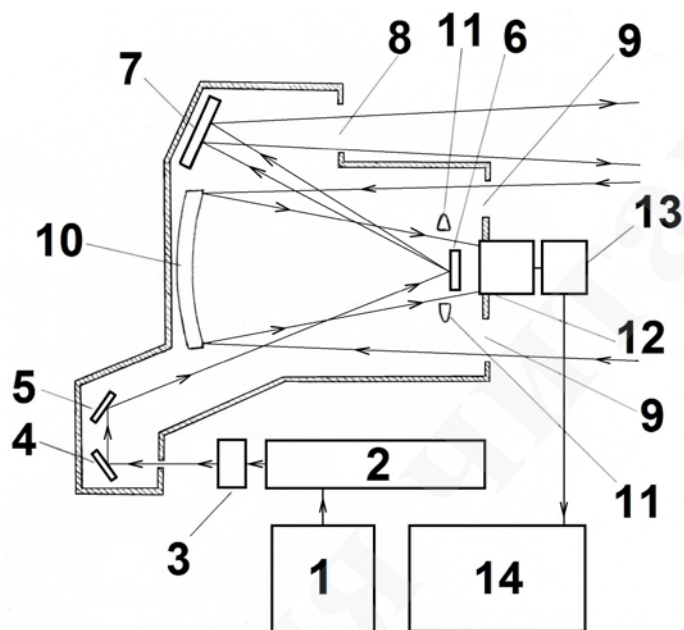


Рис. 1. Блок-схема лазерного газоанализатора дифференциального поглощения (ЛГДП)

Излучение перестраиваемого лазера 2, промодулированное по частоте с помощью блока модуляции 3, подаётся поворотными зеркалами 4, 5 на сканирующее зеркало телескопа 6. Сканирующее зеркало 6 вместе со вспомогательным зеркалом 7 обеспечивает направление зондирующего излучения через выходное окно 8 в нужную точку пространства, в которой обеспечивается отражение излучения в обратном направлении. Топографический объект (стена дома, заводские конструкции и т.п.) используется в качестве удалённого отражателя при определении с помощью ЛГДП средней концентрации исследуемых загрязняющих газов вдоль заданного участка приземного слоя атмосферы). Отражённое от топографического объекта излучение проходит в обратном направлении выбранную трассу зондирования, через входное окно 9 попадает на фокусирующее зеркало телескопа 10 и с помощью оптического корректора 11 и согласующей оптической системы 12 подаётся на спектроанализатор 13. Сигналы со спектроанализатора передаются в компьютер 14 для дальнейшей обработки и визуализации получаемых данных.

5.2. Газоаэрозольный голографический лидар (ГГЛ)

Газоаэрозольный голографический лидар предназначен для определения СКР-методом содержания атмосферных газов и для определения содержания аэрозоля при помощи голографических методов.

Определение химического состава атмосферы методом СКР основано на анализе спектра рассеянного назад излучения, в котором кроме линий, характеризующих падающий свет, наблюдаются добавочные линии-спутники. Различие в частотах возбуждающей первичной линии и линий каждого из спутников является характеристикой рассеивающего вещества и равно частотам собственных колебаний его молекул.

Метод СКР позволяет определять концентрацию исследуемого газа, используя зависимость между числом фотоэлектронов $P(z, \lambda_R)$ в сигнале, который принят лидарной системой на длине волны СКР исследуемого газа λ_R , и концентрацией этого газа $N(z)$ на расстоянии z от лидара. Эта зависимость определяется выражением [17]:

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

где n_0 – излучённое лидаром число фотонов; K – коэффициент пропускания оптики приёмо-передающей системы лидара; S – площадь приёмной апертуры лидара; η – квантовая эффективность используемого в лидаре фотоприёмника; Δz – интервал наблюдения (строб); σ_R – обратное поперечное сечение СКР исследуемой газовой компоненты; λ_0 – длина волны зондирующего лазерного импульса; $\sigma_A(\xi, \lambda_0)$ $\sigma_M(\xi, \lambda_0)$ $\sigma_A(\xi, \lambda_R)$ $\sigma_M(\xi, \lambda_R)$ – коэффициенты аэрозольного (A) и молекулярного (рэлеевского) (M) рассеяния на длинах волн λ_0 и λ_R , соответственно.

Число фотонов n_0 в лазерном зондирующем импульсе определяется выражением:

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

где h – постоянная Планка; c – скорость света; W – энергия в лазерном импульсе.

Коэффициент молекулярного рассеяния в зависимости от длины волны λ можно определить из уравнения Рэлеевского рассеяния таким образом [18]:

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

где $n = 1.00029$ – показатель преломления воздуха; H – высота над уровнем моря атмосферной точки, в которой произошло молекулярное рассеяние; $N = 2.504 \cdot 10^{25}$ – количество молекул в одном кубическом метре стандартной атмосферы; $\rho(H)$ – коэффициент плотности атмосферы.

Коэффициент плотности атмосферы можно аппроксимировать экспоненциальной функцией [18]:

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

где $H_0 = 7994$ м называется приведённой высотой.

Коэффициент аэрозольного рассеяния σ_A в формуле (2) определяется выражением [5]:

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

где a – радиус аэрозольной частицы; $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$ – параметр, который используется в теории Ми и представляет собой размер аэрозольной частицы в относительных единицах; $Q_s(x)$ – фактор эффективности рассеяния.

Функция $Q_s(x)$ вычисляется по формулам Ми и известным константам вещества, из которого состоит аэрозоль [5].

Поперечное сечение СКР (σ_R) может быть получено теоретически в рамках квантовомеханической теории взаимодействия системы частиц с монохроматическим линейно поляризованным светом.

Для определения концентрации газовых компонент по формуле (2) необходимо точное знание всех входящих в неё параметров. Однако, учитывая тот факт, что многие коэффициенты в формуле (2) зависят от длины волны и для разных газов будут разными, использовать данное выражение на практике оказывается не всегда удобным. Важным преимуществом метода СКР является то, что абсолютную концентрацию газовых компонент можно определить путём сравнения интенсивности спутников исследуемых загрязнителей с интенсивностью спутника, обусловленного одним из основных атмосферных газов. Обычно производится сравнение с азотом или кислородом, концентрация которых в приземной области атмосферы является известной и достаточно стабильной во времени. При этом из уравнения (2) лазерной локации для СКР исключаются сложные атмосферные и инструментальные параметры, и концентрация определяемого газа $N_x(z)$ может быть вычислена по формуле:

$$N_x(z) = M \frac{P_x(z, \lambda_{Rx})}{P_{N_2}(z, \lambda_{RN_2})} \frac{\sigma_{RN_2}}{\sigma_{Rx}} N_{N_2}(z), \quad (7)$$

где M – аппаратная константа, определяемая различиями в коэффициентах пропускания оптики и чувствительности фотоприёмника для длин волн спутников λ_{Rx} и λ_{RN_2} ; $P_x(z, \lambda_{Rx})$ и $P_{N_2}(z, \lambda_{RN_2})$ – число зарегистрированных фотоэлектронов при СКР на молекулах исследуемого газа и молекулах атмосферного азота, соответственно; σ_{Rx} и σ_{RN_2} – обратные поперечные сечения СКР исследуемого газа и азота; $N_{N_2}(z)$ – концентрация азота.

В отличие от метода дифференциального поглощения, метод СКР обладает несколько меньшей чувствительностью и дальностью (до 2 км). Однако он

позволяет получать с высоким разрешением (порядка одного метра) распределение загрязнителей вдоль трассы зондирования и может быть эффективным при экологическом мониторинге участков атмосферы, непосредственно граничащих с промышленными предприятиями.

В предлагаемом газоаэрозольном голографическом лидаре, принципиальная блок-схема которого представлена на рис. 2, зондирование атмосферы производится на двух частотах. С этой целью излучение импульсного неодимового лазера 1 с длиной волны $\lambda_0=1060$ нм подается на удвоитель частоты 2.

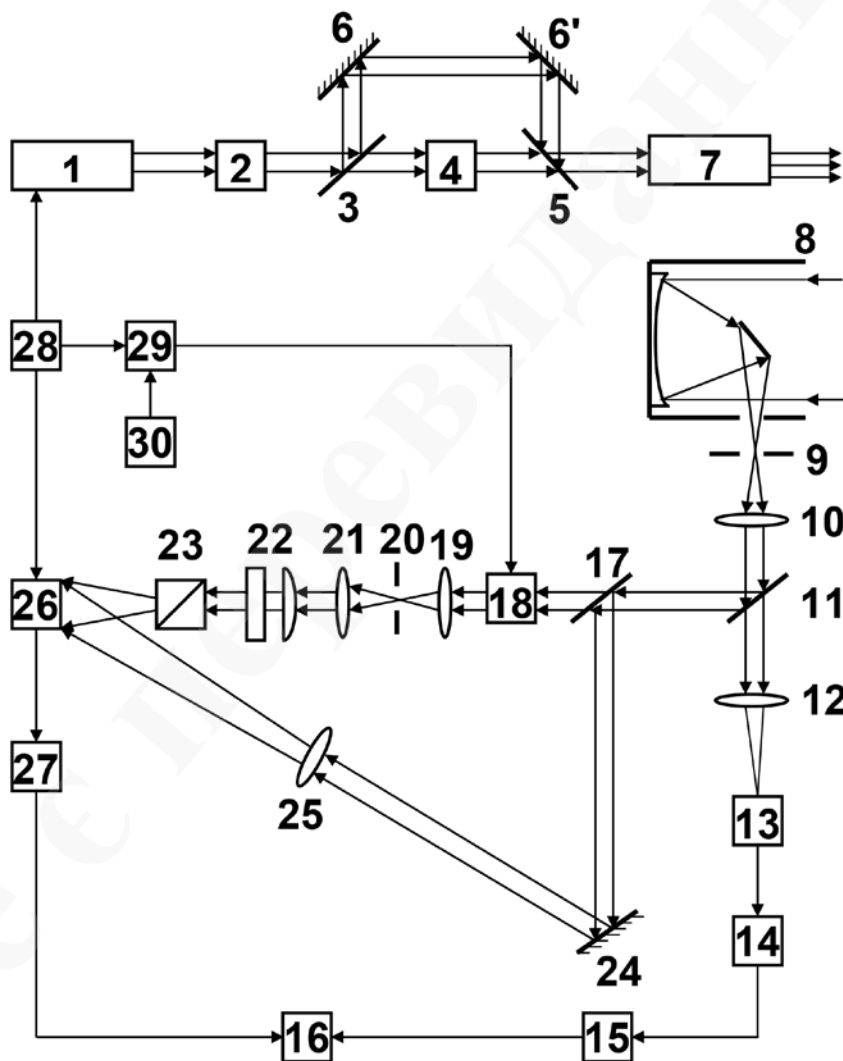


Рис. 2. Блок-схема газоаэрозольного голографического лидара

После прохождения удвоителя частоты 2 излучение с длиной волны $\lambda_1=530$ нм делится полупрозрачным зеркалом 3 на два пучка, один из которых вновь подается на удвоитель частоты 4. Импульсы, имеющие после удвоителя частоты 4 длину волны $\lambda_2=265$ нм, попадают через отражательный интерференционный фильтр 5 на коллиматор 7 и используются для газоанализа атмосферы методом СКР. Излучение с длиной волны $\lambda_1=530$ нм, отраженное от

полупрозрачного зеркала 3, отражается от поворотных зеркал 6 и 6', направляется в коллиматор 7 при помощи отражательного интерференционного фильтра 5 и используется для поляризационного голографического зондирования аэрозоля. Свет, рассеянный назад исследуемым объемом атмосферного воздуха, попадает в приемный телескоп 8, проходит через диафрагму 9, согласующий объектив 10 и делится на два пучка отражательным интерференционным фильтром 11. Часть света с длиной волны $\lambda_l=530$ нм, отраженная интерференционным фильтром 11, используется для формирования поляризационных голограмм, а прошедший через поляризационный фильтр 11 свет всех оставшихся длин волн с помощью собирающего объектива 12 подается на двойной монохроматор 13. Двойная монохроматизация позволяет избавиться от паразитного света, а изображение исследуемого участка спектра попадает на матрицу световодов 14, которая дает возможность «настраиваться» на выделение линий-спутников различных загрязняющих газов. С матрицы световодов 14 анализируемая часть спектра через согласующую оптическую систему 15 поступает в компьютер 16 для регистрации и обработки.

Аэрозольный канал рассматриваемого газоаэрозольного голографического лидара позволяет производить исследование атмосферного аэрозоля непосредственно по анализу изображений частиц, содержащихся в зондируемом объеме воздуха. С этой целью был разработан метод регистрации голограмм сфокусированного изображения с энергетически усиленными сфокусированными опорными сигналами, формируемыми делением отражённого излучения по интенсивности, поляризации или фронту волны [19–21]. Данный метод позволяет не только использовать лазеры с ограниченной длиной когерентности, но и компенсировать влияние атмосферной турбулентности на качество изображений.

В представленном на рис. 2 газоаэрозольном голографическом лидаре используется комбинированный метод деления отражённого излучения по интенсивности и поляризации. С этой целью выделенное с помощью отражательного интерференционного фильтра 11 излучение с длиной волны $\lambda_l=530$ нм при помощи полупрозрачного зеркала 17 делится по интенсивности и направляется в два канала – объектный и опорный. В опорном канале излучение усиливается оптическим квантовым усилителем (ОКУ) 18 и фокусируется объективом 19 в плоскость диафрагмы 20, с помощью которой производится необходимая пространственная фильтрация опорных колебаний [22].

Запуск оптического квантового усилителя 18 осуществляется блоком питания 29 при помощи импульсов, поступающих с выхода синхронизатора 28, которые задерживают относительно зондирующие импульсы на величину запаздывания сигналов, рассеянных на аэрозоле. В блоке управления 30 вырабатывается управляющее напряжение, с помощью которого регулируют коэффициент усиления ОКУ, поддерживая необходимое соотношение мощностей опорного и объектного сигналов в плоскости формирования голограммы.

Для разделения отражённого излучения по поляризации и получения поляризационных голограмм зондируемого объема воздуха опорный пучок с помощью согласующего объектива 21 подается на скрещенные цилиндрические

линзы 22, формирующие пучок с прямоугольным сечением, после чего направляется на поляризационную призму 23. Поляризационная призма 23 создает на выходе опорный пучок, содержащий набор линейно поляризованных компонент с непрерывно меняющимся в плоскости формирования голограмм азимутом [23, 24].

Объектный сигнал направляется полупрозрачным зеркалом 17 на отражатель 24, проходит через объектив 25 и поступает на вход блока формирования голограмм 26, где интерферирует с опорными колебаниями. Запуск блока формирования голограмм 26 осуществляется от синхронизатора 28. Поскольку поляризация опорных колебаний различна, то интерференция будет происходить только в тех областях плоскости формирования голограмм, где поляризации опорного и объектного сигналов совпадут.

Так как при отражении от жидкокапельного аэрозоля состояние поляризации не меняется, а при отражении от твердых частиц происходит деполяризация, то изображения качественно различных аэрозольных частиц формируются на пространственно разнесенных участках голограммы. Это дает возможность с помощью блока восстановления изображений 27 и компьютера 16 вести автоматический раздельный подсчет аэрозольных частиц, обладающих различными физическими свойствами. Таким образом, лидарная голография, позволяющая вести определение счётной концентрации и иных параметров непосредственно по анализу изображений частиц в атмосферном воздухе, является на сегодняшний день единственным дистанционным методом, не требующим введения каких-либо априорных сведений об исследуемом аэрозоле.

6. Результаты исследования

6.1. Оценка эффективности работы СКР-канала ГГЛ

Оценка эффективности разработанного СКР-канала газоаэрозольного голографического лидара (ГГЛ) была проведена с использованием формулы (2) для некоторых наиболее распространённых загрязняющих атмосферу веществ (CO , NO_2 , SO_2 , CH_4 , H_2S , C_2H_6). Ниже приведены технические параметры разработанной лидарной системы, которые были взяты для расчётов.

Энергия импульса основной гармоники неодимового лазера составляет 500 мДж, длительность 6 нс, частота следования импульсов – 100 Гц. Энергия импульса на длине волны $\lambda_2=265$ нм составляет 100 мДж.

Диаметр приёмной апертуры телескопа был выбран равным 500 мм. Средний коэффициент пропускания оптики приёмо-передающей системы лидара на длинах волн от 250 нм до 290 нм был взят равным 50 %.

Используемый спектрометр «Ocean-FX» (США) оснащён КМОП-матрицей (КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник, на англ. CMOS – complementary metal-oxide-semiconductor) «Hamamatsu S11639» (Япония) [25], которая обладает повышенной квантовой эффективностью в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне (от 45 % и выше в зависимости от длины волны). Для расчётов было взято значение η в диапазоне от 250 нм до 290 нм, равное 40 %. Соотношение сигнал/шум в используемом спектрометре при одиночном сканировании равно 400:1.

При компьютерном моделировании работы СКР-лидара можно пренебречь экспоненциальной зависимостью плотности атмосферы от высоты (5), поскольку разрабатываемое устройство предназначено для зондирования приземного слоя атмосферы на высотах порядка километра. На таких высотах плотность атмосферы $\rho(H)$ можно считать постоянной и принять её за единицу. Расчёты проводились для прозрачной атмосферы, при которой рассеяние от фонового аэрозоля примерно равно молекулярному рассеянию [26], определяемому формулой (4).

Были проведены расчёты для ряда часто встречающихся загрязняющих газов. При этом содержание в атмосфере CO, NO₂, SO₂, H₂S, C₆H₆ было взято на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК) в рабочей зоне предприятия [27]. Использованные для расчётов концентрации и комбинационные сдвиги для перечисленных загрязняющих газов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Концентрации и комбинационные сдвиги частоты загрязняющих газов, использованные для расчётов

Газ	Комбинационный сдвиг частоты (см ⁻¹) [28]	Концентрация	
		(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

Массовая концентрация азота в приземном слое стандартной атмосферы была взята равной 75,51 % [29].

Оценочные расчёты эффективности работы лидара проводились по формуле (2) в предположении, что трасса зондирования является однородной. В этом случае коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния, стоящие под знаком интеграла, являются константами, так что интегрирование по пространственной координате даёт только расстояние до точки зондирования. На рис. 3, 4 приведены результаты расчётов для трассы зондирования от 50 м до 200 м.

При компьютерном моделировании работы лидара в режиме накопления сигнала было учтено, что входящее в формулу (2) значение n_0 определяется не только выражением (3), но также пропорционально времени накопления. Поскольку различные газы обладают различными значениями обратного поперечного сечения СКР (σ_R) и, кроме того, расчёты проводились для концентраций, различных для разных газов (табл. 1), то для достижения примерно одинаковых результатов для разных газов требуется различное время накопления сигнала. Это хорошо видно на рис. 3, где рядом с химической формулой загрязняющих газов в скобках указано время накопления сигнала, для которого были рассчитаны представленные графики.

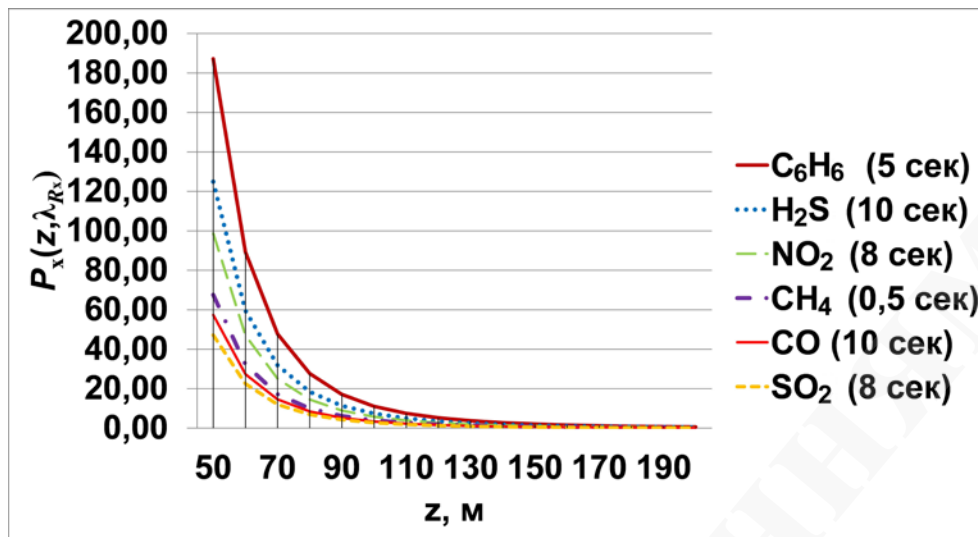


Рис. 3. Количество зарегистрированных лидарной системой фотоэлектронов $P_x(z, \lambda_{Rx})$ в зависимости от расстояния до точки зондирования (z) для различных исследуемых газов

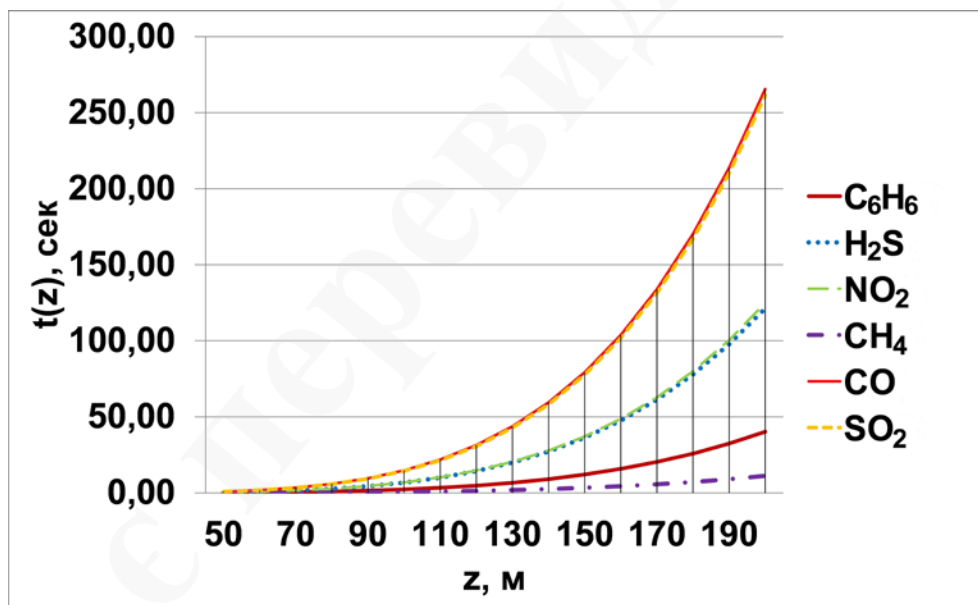


Рис. 4. Зависимость времени обнаружения исследуемых загрязняющих газов от расстояния до точки зондирования

С учётом того, что n_0 пропорционально времени накопления сигнала, также были проведены расчёты зависимости времени обнаружения исследуемых загрязняющих газов от расстояния до точки зондирования, которые представлены на рис. 4. Как видно из графиков на рис. 4, требуемое время накопления сигнала резко возрастает с расстоянием по закону, близкому к квадратичному. Расчёты показали, что для обнаружения исследуемых загрязняющих газов при их концентрации, равной ПДК в рабочей зоне предприятия, на расстоянии в полкилометра требуется проводить режим накопления сигнала в течение десятков минут. Например, для обнаружения CH_4 потребуется 10 минут, для обнаружения C_6H_6 – 36 минут. Это, безусловно, снижает оперативность в работе разработанной лидарной системы и делает проблематичным построение трёхмерного

пространственного распределения определяемого газа, поскольку при наличии ветра за десятки минут произойдёт перемешивание воздушных масс. Однако, как видно из графиков на рис. 4, при дальности обнаружения в 200 м режим накопления составляет для исследованных газов от 11 секунд (для CH_4) до 4 минут (для CO). Это является вполне приемлемым с точки зрения оперативности проводимых лидаром измерений.

6.2. Метрологическое обеспечение системы обработки информации информативных параметров ЛГДП и ГГЛ

Лазерный комплекс, в состав которого входят ЛГДП и ГГЛ системы, относится к отрасли защиты окружающей среды, которые становятся между человеком и природой и в значительной степени обуславливают как их взаимодействие, так и само сосуществование человека и природы. ЛГДП и ГГЛ системы распределены в пространстве, имеют сложную иерархическую структуру и включают в свой состав измерительные, вычислительные и управляющие элементы, которые связаны между собой каналами связи. Сложность ЛГДП и ГГЛ систем обуславливает необходимость обеспечения требований к повышенной точности измерений. В ЛГДП и ГГЛ системах задействованы для принципиально разных подхода к решению задачи повышения точности – конструктивный и структурно-алгоритмический методы. Конструктивный базируется на использовании стабильных элементов, материалов, совершенствовании технологии производства. Структурно-алгоритмический метод повышения точности базируется на введении тестовых влияний в измерительный преобразователь, которые позволяют получить информацию не только об измеряемой величине, но и о погрешностях для коррекции функции преобразования и повышения точности измерений [30]. Решение поставленных заданий достигается за счёт внедрения метрологического обеспечения ЛГДП и ГГЛ систем.

Метрологическое обеспечение ЛГДП и ГГЛ систем – это «установка и применение научных и организационных основ, технических и программных средств, правил и норм с целью обеспечения заданной точности измерений и заданной точности управляющих действий» [31]. Одной из важных задач повышения точности ЛГДП и ГГЛ является внедрение метрологического обеспечения системы обработки информации. ЛГДП и ГГЛ являются информационными системами, поэтому характеристики точности и вероятность получения информации являются основными.

Информация – фундаментальная величина, её невозможно выразить через другие основные величины. Информация включает содержание системы о самой себе и является внутренним свойством. Математически информация I определяется как мера упорядочения множества, что состоит из разных объектов. Мера информации I , ассоциированная с системой, которая может принять N возможных состояний, есть $\log_2 N$ и измеряется в битах (*bit*). Уравнение информации справедливо, если разные состояния являются равновероятными [32].

Содержание информационной модели параметра – это совокупность (единство) содержания стохастической и детерминированной частей, которые определяют численное значение возможных состояний параметра относительно порога чувствительности и вероятность перехода из одного состояния в другое. Стохастическая часть такой модели несёт в себе информацию неопределённости порога чувствительности информативного параметра, а детерминированная несёт численное значение возможных состояний этих параметров.

Методология информационного моделирования информативного параметра базируется на «отображении» свойств какой-либо природы, которые идентифицируются как проявление интенсивности физических величин, место и время их проявления в виде модели.

В основе принципа системы обработки информации в ЛГДП и ГГЛ лежит фундаментальный подход с использованием информации квантовых составляющих метрологических параметров физических величин (решение Международного комитета мер и весов от 20 мая 2019 г.).

Использование в системах обработки информации квантовых составляющих метрологических параметров ЛГДП и ГГЛ автоматически даёт абсолютную погрешность расчёта, которая зависит от количества принятых знаков после запятой числового значения информации параметра [33].

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильными сторонами разработки является использование различных спектральных методов, которое обеспечивает комплексный подход к решению задач экологического мониторинга приземного слоя атмосферы в жилых кварталах и промышленных зонах крупных мегаполисов. ЛГДП позволяет выявлять малые концентрации загрязняющих газов вдоль стационарной трассы зондирования и пригоден для использования в жилых кварталах современного города. ГГЛ обеспечивает возможность получения в течение нескольких минут трёхмерных изображений распределения газовых и аэрозольных компонент атмосферного воздуха с пространственным разрешением порядка 1 м. Это позволит использовать ГГЛ в промышленных зонах для надёжного и оперативного определения штрафных санкций в отношении предприятий, нарушающих экологические нормы.

Weaknesses. К недостаткам выполненной работы следует отнести то, что на данном этапе было проведено компьютерное моделирование только одного газоанализирующего СКР-канала ГГЛ. Компьютерное моделирование аэрозольного канала ГГЛ не было проведено ввиду сложности физико-математического описания процесса регистрации и обработки информации об аэрозолях методами лидарной голографии.

Opportunities. Проблемы оперативного дистанционного мониторинга атмосферы остро стоят не только перед Украиной, но и перед всеми промышленно развитыми странами. Разработанный мобильный лазерный комплекс при его внедрении в практику способен обеспечить своевременное обнаружение источников загрязнения атмосферы с большой точностью с целью

улучшения экологической обстановки крупных мегаполисов и предотвращения экологических катастроф.

Threats. Сложности во внедрении результатов данной разработки в практику связаны, прежде всего, с необходимостью разработки технологической документации на изготовление оригинальных комплектующих частей в соответствии со схемами ЛГДП и ГГЛ. Кроме того, создание промышленного образца разработанного лазерного комплекса требует довольно значительных капиталовложений, поскольку в состав комплекса входят дорогостоящие детали и оборудование.

8. Выводы

1. Проведенный анализ физических принципов взаимодействия лазерного излучения с компонентами атмосферы показал следующее. Метод дифференциального поглощения является эффективным для определения средней концентрации загрязняющих газов вдоль стационарной трассы зондирования, когда необходимо определить наличие небольших количеств наиболее распространённых загрязнителей. Данный метод можно с успехом применить для экологического мониторинга состояния воздушной среды в пределах городских кварталов, достаточно удалённых от промышленных объектов.

Метод спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) эффективен при определении пространственного распределения загрязняющих газов с хорошим пространственным разрешением (порядка одного метра) на относительно небольших расстояниях (до 1 км). При этом список определяемых газов ничем конструктивно не ограничен. Данный метод позволяет достаточно быстро и с хорошей пространственной точностью выявить источники загрязнения. Поэтому метод СКР можно с успехом применить для экологического мониторинга приземного слоя атмосферы в промышленной зоне крупных мегаполисов.

Наиболее эффективными для определения типа и счётной концентрации аэрозоля являются методы лидарной голографии, разработанные в лаборатории радио- и оптической голографии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Данные методы позволяют вести отдельный автоматический подсчёт жидкокапельных и твёрдых (пыль, сажа) аэрозольных частиц в исследуемом объёме атмосферного воздуха непосредственно по анализу их изображений. Изображения аэрозольных частиц восстанавливаются по регистрируемым голограммам зондируемой области воздушного пространства.

2. Созданы принципиальные схемы лазерного газоанализатора дифференциального поглощения (ЛГДП) и газоаэрозольного голографического лидара (ГГЛ). В ЛГДП на практике реализуется физический принцип поглощения молекулами исследуемого газа кванта световой энергии с определённой частотой. В ГГЛ для определения газового состава воздуха реализуется на практике метод спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) кванта света на молекулах атмосферных газов. Для получения информации об аэрозолях, входящих в состав исследуемого участка атмосферы, в ГГЛ реализуются оригинальные методы лидарной голографии.

Проведена оценка эффективности газоанализирующего канала ГГЛ путём компьютерного моделирования процесса обнаружения ряда наиболее распространённых загрязняющих газов. Оценка была проведена для случая, когда диаметр приёмной апертуры телескопа ГГЛ составляет 500 мм, а энергия зондирующего импульса равна 100 мДж. Компьютерное моделирование показало, что при таких параметрах ГГЛ обеспечивает обнаружение загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы на уровне единиц ppm при дальности обнаружения до 200 м с разрешением в 1 м. Обнаружение загрязняющих газов возможно производить как в ночное, так в дневное время при работе в режиме и накопления сигнала от 10 с до 4 мин.

3. Проведено описание основных принципов метрологического обеспечения системы обработки информации в создаваемом лазерном комплексе для экологического мониторинга приземного слоя атмосферы. Сделан вывод, что сложность ЛГДП и ГГЛ систем предъявляет повышенные требования к точности измерений. В создаваемом лазерном комплексе повышение точности измерений достигается как конструктивно, так и за счёт внедрения метрологического обеспечения ЛГДП и ГГЛ систем.

Литература

1. Krekov, G. M., Matvienko, G. G. (2010). Razvitie lazernykh tekhnologii v probleme distantsionnogo zondirovaniia atmosfery. *Optika atmosfery i okeana*, 23 (10), 865–844.
2. Ruzankina, J., Elizarov, V., Konopel'ko, L., Zhevlakov, A., Grishkanich, A. (2018). Raman lidar with for geocological monitoring. *Journal of Physics: Conference Series*, 1124, 051036. doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1124/5/051036>
3. Wandinger, U. (2005). Introduction to Lidar. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 1–18. doi: http://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_1
4. Alimov, S. V., Kascheev, S. V., Kosachev, D. V., Petrov, S. B., Zheviakov, A. P. (2007). Multifunctional lidar for needs of oil-and-gas pipes. *Proc. of SPIE*, 6610. doi: <http://doi.org/10.1117/12.739830>
5. Ismail, S., Browell, E. V. (2015). Differential absorption lidar. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 277–288. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-382225-3.00204-8>
6. Amediek, A., Ehret, G., Fix, A., Wirth, M., Büdenbender, C., Quatrevalet, M. et. al. (2017). CHARM-F – a new airborne integrated-path differential-absorption lidar for carbon dioxide and methane observations: measurement performance and quantification of strong point source emissions. *Applied Optics*, 56 (18), 5182–5197. doi: <http://doi.org/10.1364/ao.56.005182>
7. Wagner, G. A., Plusquellic, D. F. (2016). Ground-based, integrated path differential absorption LIDAR measurement of CO₂, CH₄, and H₂O near 16 μm. *Applied Optics*, 55 (23), 6292–6310. doi: <http://doi.org/10.1364/ao.55.006292>
8. Wagner, G. A., Plusquellic, D. F. (2018). Multi-frequency differential absorption LIDAR system for remote sensing of CO₂ and H₂O near 16 μm. *Optics Express*, 26 (15), 19420–19434. doi: <http://doi.org/10.1364/oe.26.019420>
9. Shiina, T. (2018). *Hydrogen gas detection by mini-Raman lidar. Ionizing Radiation Effects and Applications*. Books on Demand, 41–60.

10. Kim, D., Lee, H. (2019). Development of Raman Lidar for Remote Sensing of CO₂ Leakage at an Artificial Carbon storage experimental site. *Geophysical Research Abstracts*, 21.
11. Kim, D., Kang, H., Ryu, J.-Y., Jun, S.-C., Yun, S.-T., Choi, S. et. al. (2018). Development of Raman Lidar for Remote Sensing of CO₂ Leakage at an Artificial Carbon Capture and Storage Site. *Remote Sensing*, 10 (9), 1439. doi: <http://doi.org/10.3390/rs10091439>
12. Astmann, A., Müller, D. (2005). Lidar and atmospheric aerosol particles. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 105–142. doi: http://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_4
13. Matvienko, G. G., Banakh, V. A., Bobrovnikov, S. M., Burlakov, V. D., Veretennikov, V. V., Kaul, B. V. et. al. (2009). Razvitie tekhnologii lazernogo zondirovaniia atmosfery. *Optika atmosfery i okeana*, 22 (10), 915–930.
14. Volkov, N. N. (2012). Vybor parametrov mnogovolnovogo aerzolnogo lidara dlia distantsionnogo zondirovaniia atmosfery. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 1 (77), 6–9.
15. Gimmetstad, G. G. (2005). Differential-absorption lidar for ozone and industrial emissions. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 187–212. doi: http://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_7
16. Wandinger, U. (2005). Raman lidar. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 241–271. doi: http://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_9
17. Nishita, T., Sirai, T., Tadamura, K., Nakamae, E. (1993). Display of the earth taking into account atmospheric scattering. *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93)*. Anaheim, 175–182. doi: <http://doi.org/10.1145/166117.166140>
18. Deirmendjian, D. (1969). *Electromagnetic scattering on spherical polydispersions*. American Elsevier Pub. Co, 290.
19. Safronov, G. S., Titar, V. P. (1994). *Opticheskii lokator*. Patent No. 944437 RF.
20. Titar, V. P., Shpachenko, O. V. (2001). Poliarizatsionnye golograficheskie metody lidarnogo kontrolya za sostoianiem atmosfery. *Elektromagnitnye iavleniia*, 2 (1 (5)), 111–117.
21. Tytar, V. P., Shpachenko, O. V. (2001). Holohrafycheskyi lydar dlia ekolohycheskoho monytorynha atmosferi. *Visnyk khakrivskoho natsionalnoho universytetu im. V. N. Karazina. No. 513. Radiofizyka ta elektronika*, 1, 151–160.
22. Safronov, G. S., Titar, V. P. (1994). *Opticheskii lokator*. Patent No. 743401 RF.
23. Sogokon, A. B., Titar, V. P. (1983). *Golograficheskoe ustroistvo*. A. C. No. 1149206 SSSR.
24. Safronov, G. S., Sogokon, A. B., Titar, V. P. (1980). *Sposob golograficheskoi identifikatsii materialov udalennykh obektov*. A. S. No. 678969 SSSR.
25. *Hamamatsu Image Sensors*. Selection guide (2019). Available at: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/image_sensor_kmpd0002e.pdf
26. Razenkov, I. A. (2013). Aerzolnii lydar dlia nepreryvnykh atmosfernykh nabliudenii. *Optika atmosfery i okeana*, 26 (1), 52–63.
27. *Hranychno dopustymi kontsentratsii (HDK) khimichnykh chynnykiv u povitri robochoi zony, zatverdzeni HDSL vid 17.07.2015*. Available at: <http://normativ.ua/sanpin/tdoc27838.php>

28. Measures, R. M. (1992). *Laser remote sensing: fundamentals and applications*. Malabar: Krieger Publishing Co., 510.

29. Sorokhtin, O. G., Ushakov, S. A. (2002). *Razvitie Zemli*. Moscow: Izd-vo MGU, 506.

30. Tuz, Iu. M. (1976). *Strukturnye metody povysheniia tochnosti izmeritelnykh ustroystv*. Kyiv: Vischa shkola. Golovnoe izd-vo, 127.

31. DSTU 2682-94 *Metrolohichne zabezpechennia* (1994). Osnovni polozhennia. Vvedenyi 26.07.94. Kyiv: Derzh standart Ukrainy, 439.

32. Olson, G., Piani, D. (2001). *Tsifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniia*. Saint Petersburg: Nevskii dialekt, 557.

33. Ruzhentsev, Y. V., Lutskyi, S. V., Fetkyv, V. P., Podzyhun, O. I. (2017). Discrete probabilistic information laws factor of efficiency. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, 1, 67–71.