

## Основные направления совершенствования программно-математического обеспечения подвижных лазерных комплексов дистанционной химической разведки

В.А. Иноземцев, А.А. Григорьев, И.Н. Ефимов,

А.А. Позвонков, А.С. Солошин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Министерства обороны Российской Федерации, 412918, Российская Федерация, Саратовская обл., г. Вольск-18, ул. Краснознаменная, д. 1*

Поступила 07.09.2018 г. Принята к публикации 10.01.2019 г.

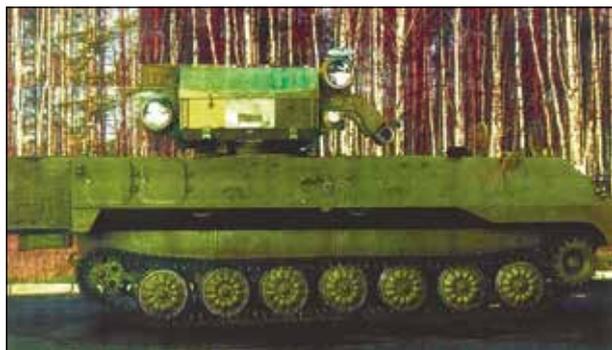
Современный уровень развития теории лазерной локации и технических возможностей лидарных систем позволяет не только решать задачи дистанционного контроля оптических свойств аэрозольных образований, но и с помощью многочастотного лазерного зондирования измерять их концентрационные характеристики и параметры функции распределения аэрозольных частиц по дисперсному составу. Поэтому дистанционные средства химической разведки активного типа с функцией измерения параметров грубодисперсных аэрозолей отравляющих веществ (ОВ) и сильно действующих ядовитых веществ (СДЯВ) представляют собой новое поколение такой техники. Придание перспективным подвижным лидарным комплексам дистанционной разведки функций измерительных систем возможно путем внедрения современных программно-вычислительных комплексов и специальных алгоритмов по обращению данных лидарного зондирования в макро- и микроструктурные характеристики облаков физиологически активных веществ (ФАВ) в атмосфере. Тем самым обеспечивается контроль концентраций многокомпонентных смесей ФАВ, параметров функции распределения аэрозоля ФАВ по дисперсному составу с наложением изолиний концентраций индицируемых ФАВ на карту местности. Проведенные математические исследования позволили сформулировать основные требования к многочастотным лидарным измерениям: ошибка оптических измерений для всех  $\lambda_i$  не должна превышать 5 %; – мнимая часть комплексного показателя преломления вещества аэрозоля ФАВ должна быть  $\chi \leq 0,005$ ; ошибка в задании вещественной части комплексного показателя преломления должна находиться в пределах  $\pm 0,02$ . При соблюдении этих требований метод многочастотного зондирования становится эффективным инструментом исследования дисперсного состава аэрозолей.

*Ключевые слова:* активная локация; дистанционная химическая разведка; зондирование; лидарный комплекс; микроструктура облака ФАВ; обратная оптическая задача; программно-математическое обеспечение.

*Библиографическое описание:* Иноземцев В.А., Григорьев А.А., Ефимов И.Н., Позвонков А.А., Солошин А.С. Основные направления совершенствования программно-математического обеспечения подвижных лазерных комплексов дистанционной химической разведки // Вестник войск РХБ защиты. 2019. Т. 3. № 1. С. 4–14.

При исследовании возможности лидарного контроля концентраций паров многокомпонентных смесей токсичных веществ уста-

новлено, что одной из проблем, возникающих при использовании дистанционных лазерных методов газового анализа, является необходи-



**Рисунок 1 – Наземный подвижный лазерный комплекс дистанционной химической разведки КДХР-1Н<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Фотография авторов.



**Рисунок 2 – Наземный лазерный комплекс дистанционной РХБ разведки КЛН-РХБР<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Фотография авторов.

мость применения специальных алгоритмов обработки для интерпретации данных лидарных измерений. Таким образом, в настоящее время назрела острая необходимость разработки программно-математического аппарата и алгоритмов обработки спектральной информации для дистанционных средств химической разведки активного типа.

Цель работы – определить основные направления совершенствования программно-математического обеспечения подвижных лазерных комплексов дистанционной химической разведки.

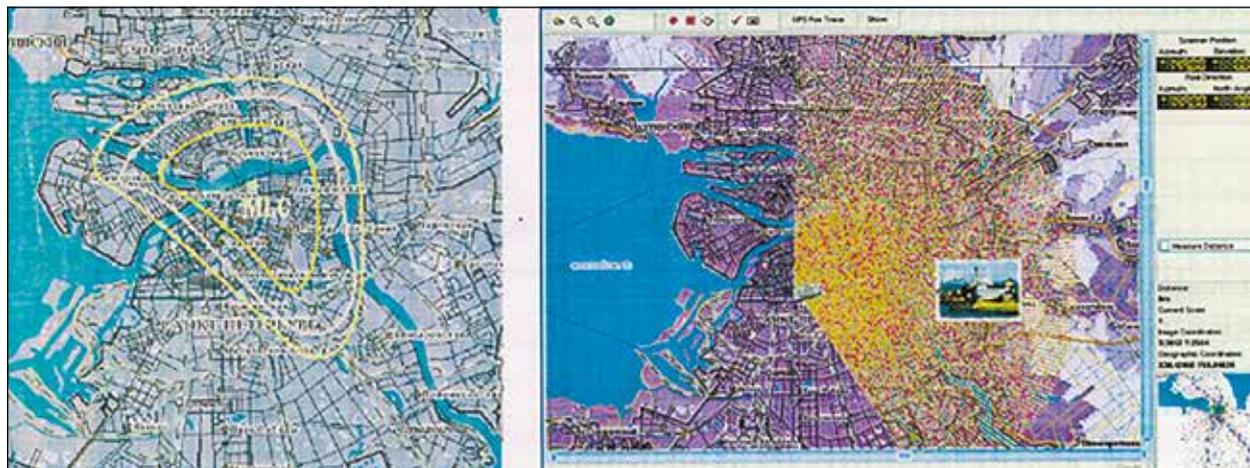
Первые отечественные исследования по разработке принципов дистанционного обнаружения аэрозолей отравляющих веществ (ОВ) типа V-газов на основе упругого аэрозольного рассеяния при одночастотном лазерном зондировании проводились ГосНИИ «Химаналит» в период 1971–1975 гг. при военно-научном сопровождении и участии специалистов ФГБУ «33 ЦНИИИ» МО РФ. Был разработан, испытан и рекомендован метод дистанционного обнаружения аэрозолей V-газов путем регистрации поляризационных эффектов в области углов глории («метод глории»). В 1989 г., после выполнения работ и завершения государственных испытаний на базах Приволжского, Туркестанского и Ленинградского военных округов, образец под шифром КДХР-1Н был принят на вооружение Советской Армии. Внешний вид образца КДХР-1Н представлен на рисунке 1.

Комплекс дистанционной химической разведки КДХР-1Н обеспечивал измерение координат обнаруженного облака V-газов, фронтального размера, глубины и высоты верхней кромки облака ОВ. Полученная информация выводилась на информационный дисплей комплекса. Она обновлялась при каждом новом сканировании облака V-газов. Одновременно на информационной панели выводилось

графическое изображение объекта индикации с привязкой его координат относительно местоположения образца КДХР-1Н. Графическое изображение облака ОВ не могло быть привязано к его концентрационным характеристикам, так как порог срабатывания изделия существенным образом зависел от дальности до объекта индикации, угла наблюдения, параметров функции распределения аэрозоля ОВ по дисперсному составу и ряда других факторов.

Разработка второго образца дистанционной индикации на основе применения последних достижений в области лазерной локации была выполнена научно-производственным предприятием «Лазерные системы» (г. Санкт-Петербург). В составе комплекса использовался набор лазерных излучателей, обеспечивающий многочастотное лазерное зондирование индицируемых облаков ФАВ в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Приемно-передающая система комплекса обеспечивала регистрацию рассеянного излучения в режиме лазерно-индуцированной флуоресценции и в режиме дифференциального поглощения-рассеяния. Внешний вид образца КЛН-РХБР представлен на рисунке 2.

По сравнению со своим предшественником, изделием – КДХР-1Н, разработанный лидарный комплекс обладал расширенными функциональными возможностями (обеспечивал одновременную индикацию паров и аэрозолей ОВ, СДЯВ и биологических средств) и лучшими тактико-техническими характеристиками (дальность действия и специфичность обнаружения). В 2010 г. образец под шифром КЛН-РХБР был принят на снабжение ВС РФ. Как и рассмотренный выше образец КДХР-1Н, комплекс обеспечивал картографирование результатов разведки и наложение их на карту местности (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Результаты дистанционного контроля аэрозольных образований, полученные с помощью комплекса КЛН-РХБР (г. Санкт-Петербург)<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Фотографии авторов.

Однако в связи с отсутствием внутренней калибровки по всем рабочим частотам комплекса, полученное графическое изображение объекта индикации также носило условный характер и не могло быть привязано к количественным характеристикам индицируемого облака ФАВ.

Анализ паровых и газовых загрязнений на трассе зондирования можно условно разбить на два этапа [1]:

- идентификация состава паровых (газовых) загрязнений (решение задачи о наличии или отсутствии того или иного токсичного вещества);

- измерение состава анализируемых загрязнений (получение количественной информации о концентрациях индицируемых компонентов).

Если задача идентификации решена или состав паровых и газовых загрязнителей заранее известен, основной проблемой газового анализа является создание специальных алгоритмов обработки для восстановления количественной информации о концентрациях газовых компонент по данным дистанционных измерений.

Рассмотрим задачу восстановления количественной информации о концентрациях газовых компонент атмосферы по данным измерений для лидара дифференциального поглощения. К лидарной системе на основе метода дифференциального поглощения-рассеяния можно отнести многочастотный лидарный комплекс КЛН-РХБР.

Общая формула для мощности сигнала, регистрируемого приемником лидара на длине волны  $\lambda_i$  и учитывающая поглощение всеми газовыми компонентами и связь коэффициента

поглощения газа  $\kappa_c(\lambda, z)$  с концентрацией его молекул  $N(z)$ , имеет следующий вид [2]:

- для метода дифференциального поглощения и рассеяния:

$$P(\lambda_i, R) = K(\lambda_i) P_0(\lambda_i) \exp \left\{ -2 \sum_0^R \int_0^R N_j(z) \sigma_{\lambda_j}(\lambda_i, z) dz - 2 \int_0^R \varepsilon(\lambda_i, z) dz \right\}, \quad (1)$$

- для метода, основанного на отражении от расположенной на фиксированном расстоянии мишени:

$$P(\lambda_i) = \bar{K}(\lambda_i) P_0(\lambda_i) \exp \left\{ -2 \sum_0^L \int_0^L N_j(z) \sigma_{\lambda_j}(\lambda_i, z) dz - 2 \int_0^L \varepsilon(\lambda_i, z) dz \right\}, \quad (2)$$

где  $K$  – число газовых компонент, а коэффициент  $\varepsilon(\lambda, z)$  характеризует «фоновое» ослабление в атмосфере.

В настоящее время при многочастотном зондировании облаков различных ФАВ реализованы различные алгоритмы восстановления состава многокомпонентных смесей, которые разработаны специалистами Центра физического приборостроения РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Института оптики атмосферы СО РАН и Института химической физики РАН. В качестве примера на рисунках 4–7 приведены результаты численного эксперимента по восстановлению концентраций газовых компонент, полученные с использованием регуляризирующих процедур обработки и стандартным методом решения системы линейных уравнений лазерного зондирования [2]. Параметр регуляризации выбирался на основе принципа невязки. Шум измерения моделировался случайным процессом с равномерным законом распределения, нулевым средним значением и заданной дисперсией. На рисунке 4 показана восстановленная концентрация фреона-12 для двухкомпонентной газовой смеси, а на рисунке 5 – концентрация трихлорэтилена для

восьмикомпонентной газовой смеси. На этих рисунках на оси ординат отложены восстановленные концентрации  $N$  газовых компонент с использованием регуляризирующих процедур обработки (кривые 1) и обычным методом решения системы линейных уравнений лазерного зондирования (кривые 2), а по оси абсцисс – среднеквадратическое относительное значение шума измерения  $\sigma_{\xi}$ .

На рисунках 6 и 7 показаны результаты восстановления концентрации газов для описанной выше восьмикомпонентной смеси в случае, когда проводится предварительное (по 10 измерениям) усреднение принятых сигналов дистанционного зондирования. На рисунке 6 приведено восстановление концентрации аммиака, а на рисунке 7 – концентрации этилена.

На этих рисунках столбец 1 показывает заданную концентрацию газовой компоненты, столбец 2 – концентрацию газовой компоненты, восстановленную стандартным методом решения системы линейных уравнений, столбец 3 – концентрацию газовой компоненты, восстановленную с использованием построения регуляризованного решения. Относительная дисперсия шума измерения на длинах волн зондирования задавалась следующей (в порядке возрастания длин волн зондирования): 0,03; 0,02; 0,03; 0,02; 0,02; 0,03; 0,04; 0,02; 0,04; 0,03; 0,02; 0,04; 0,03; 0,04; 0,03.

Результаты численного моделирования при применении алгоритмов восстановления концентраций газовых компонент по данным дистанционных лазерных измерений показывают (рисунки 4 и 5), что при отсутствии шума измерения концентрации газовых компонент точно восстанавливаются как стандартными

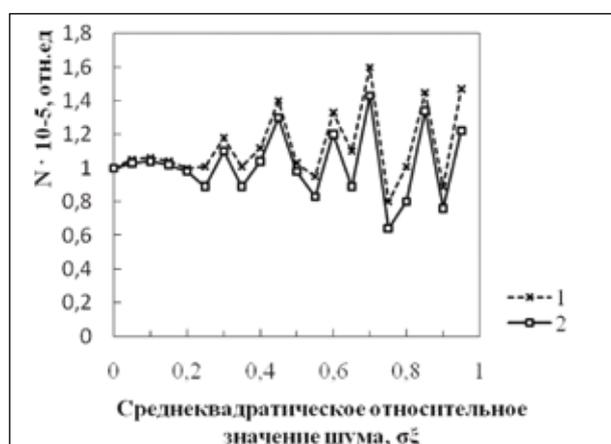
методами решения системы линейных алгебраических уравнений, так и с использованием регуляризирующих процедур восстановления.

При реальных шумах измерения в случае небольшого числа газовых компонент (не больше пяти) для восстановления концентраций газовых загрязнителей по данным лидарных измерений можно использовать стандартные методы решения системы линейных алгебраических уравнений. В этом случае ошибки восстановления концентраций газов относительно невелики (рисунок 4) и использование регуляризирующих процедур обработки не дает заметного повышения точности.

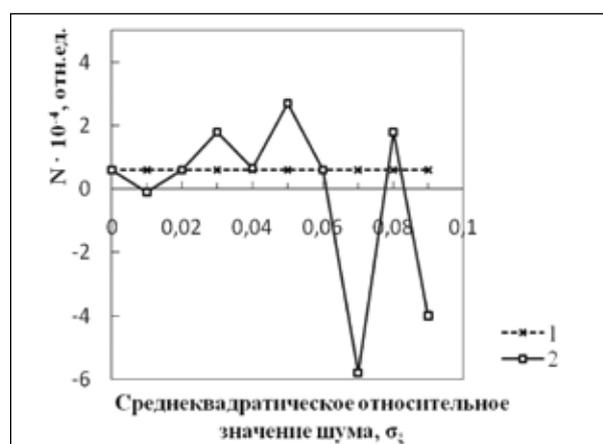
В случае большого числа газовых компонент (шесть и более) стандартные методы решения системы линейных алгебраических уравнений могут давать значения концентраций, сильно отличающиеся от их действительных значений. В этом случае необходимо использовать алгоритмы восстановления, основанные на методах решения некорректно поставленных обратных оптических задач.

Точность восстановления стандартными методами можно повысить, проводя серии измерений и усредняя принимаемые сигналы, но и в этом случае ошибки восстановления могут быть очень большими, а значения восстановленных концентраций газов – сильно отличаться от их действительных значений (рисунки 6 и 7).

Таким образом, приведенные выше результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждают возможность измерения концентраций паров (газов) ОБ и СДЯВ при многочастотном лазерном зондировании.

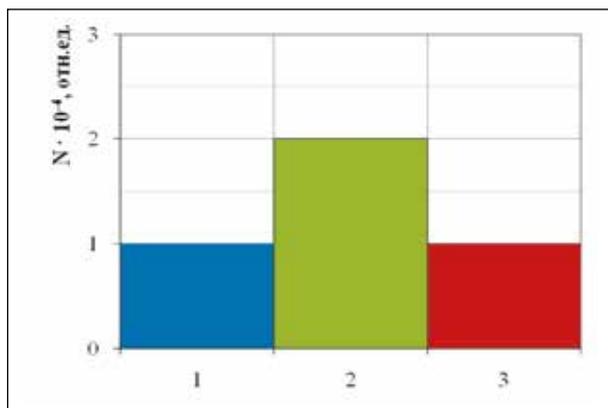


**Рисунок 4 – Восстановленная концентрация фреона-12 двухкомпонентной газовой смеси\***

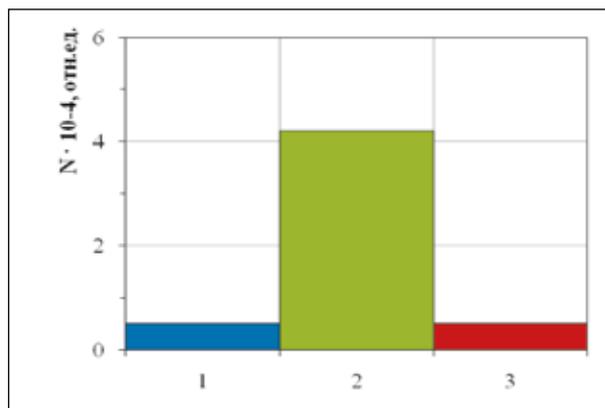


**Рисунок 5 – Восстановленная концентрация трихлорэтилена восьмикомпонентной газовой смеси**

\* Рисунки 4–7 взяты из работы Козинцева В.И., Орлова В.М., Бегова М.М. с соавт. «Опτικο-электронные системы экологического мониторинга природной среды» М.: 2002.



**Рисунок 6 – Восстановленная концентрация аммиака при использовании различных методов решения обратной оптической задачи**



**Рисунок 7 – Восстановленная концентрация этилена при использовании различных методов решения обратной оптической задачи**

При разработке дистанционных средств химической разведки активного типа КДХР-1Н и КЛН-РХБР решалась задача специфической индикации первичных облаков аэрозолей ОВ в атмосфере. При этом спектральные свойства индицируемых ОВ были заранее известны и учитывались при разработке алгоритмов идентификации ОВ на фоне аэрозолей помеховых примесей или других ФАВ. В ходе решения данной задачи не рассматривались вопросы количественного анализа индицируемых облаков различных ФАВ. Однако анализ информационных материалов показывает, что современный уровень развития теории лазерной локации и технических возможностей лидарных систем позволяет не только решать задачи дистанционного контроля оптических свойств аэрозольных образований, но и измерять их концентрационные характеристики и параметры функции распределения аэрозольных частиц по дисперсному составу.

Задача восстановления микрофизических параметров аэрозоля ФАВ по данным лидарных измерений обычно разделяется на два независимых этапа [1]:

- вычисление оптических характеристик аэрозоля (коэффициентов экстинкции  $\alpha$  и обратного рассеяния  $\beta$ ) по данным лидарных измерений;

- восстановление по этим оптическим данным микроструктурных характеристик аэрозоля (концентрация и дисперсный состав индицируемых аэрозольных частиц).

Уравнение лазерной локации содержит два неизвестных, поэтому для его решения необходимо задаваться предположениями о соотношении между ними. На этом основаны широко используемые на практике методы Клетта и Ферналда [1]. Однако подобная информация, как правило, недоступна в процессе лидарных измерений. В связи с этим оптические коэффици-

циенты индицируемого аэрозоля измеряются со значительной погрешностью. Точность измерения повышается при использовании лидара высокого спектрального разрешения или рамановского лидара (лидара комбинационного рассеяния) [3]. В этих системах молекулярное рассеяние отделяется от аэрозольного и регистрируется либо на несмещенной частоте (рэлеевское рассеяние), либо на частотах, соответствующих рамановскому (комбинационному) сдвигу молекул кислорода или азота. Предполагая распределение плотности воздуха на горизонтальных и вертикальных известным, эти лидары позволяют непосредственно определять коэффициент экстинкции  $\alpha$  и использовать его для вычисления  $\beta$ . Точность определения  $\alpha$  и  $\beta$  в подобных системах составляет около 10 % [1].

Сечение рамановского рассеяния атмосферного азота почти на три порядка меньше сечения рэлеевского рассеяния, поэтому до недавнего времени рамановские лидары использовались главным образом для исследования нижних слоев атмосферы. Лишь в последнее десятилетие прогресс в разработке мощных лазерных источников излучения, создании многослойных диэлектрических интерференционных фильтров и приемников излучения с высоким квантовым выходом обеспечили возможность надежной регистрации сигнала рамановского рассеяния на дальностях до 10 км [1].

Среди существующих подходов к оценке параметров аэрозолей наиболее простыми являются прямые методы. Они основаны на использовании целого ряда априорных предположений о типе распределения аэрозолей по размерам  $F(r)$  и о величине комплексного показателя преломления материала аэрозольных частиц  $m$ . На основе этой информации рассчитываются коэффициенты обратного рассеяния аэрозоля для различных параметров

распределения и производится их сравнение с экспериментально измеренными величинами. В результате определяются параметры распределения (средний размер и дисперсия), при которых оба набора оптических данных согласуются наилучшим образом [4]. Однако такого рода априорная информация доступна лишь для ограниченного круга задач, например, при исследовании стратосферного водного аэрозоля или для контроля параметров аэрозольных облаков ФАВ известного химического состава. Например, в работе [5] на основе данного методического подхода был предложен способ восстановления параметров функции распределения аэрозоля V-газов по данным многочастотного лазерного зондирования при возникновении запроектных аварий на объектах по хранению и уничтожению химического оружия. Сущность предложенного способа представлена на рисунке 8.

В основе предложенного методического подхода лежит использование многопараметрических рядов, которые оформляются в виде таблиц-сеток. Многопараметрический ряд представляет собой совокупность числовых значений параметров, объединенных в рамках системного анализа наиболее представительными и существенными отличительными признаками [6].

Хотя данный алгоритм позволял восстанавливать распределение аэрозоля по размерам

в значительном количестве случаев, в ряде ситуаций он вел себя неустойчиво, что приводило к серьезным ошибкам в определении параметров аэрозоля. Наблюдаемая неустойчивость могла быть связана, в том числе, и с используемым критерием выбора параметра регуляризации, поэтому при разработке аналогичного алгоритма в Центре физического приборостроения ИОФ РАН (ЦФП ИОФ РАН) [8] использовался критерий минимума невязки, поскольку он является наиболее естественным и физически понятным. В применении к лидарным измерениям этот критерий был модифицирован, используя условие неотрицательности решений, что позволило оценивать параметр регуляризации без априорного знания погрешностей измерения. Для дополнительной стабилизации решения обратной задачи в работе I. Veselovskii с соавт. [9] была предложена процедура усреднения решений, в отличие от классического метода А.Н. Тихонова и В.Я. Арсенина [7], определяющего решение, соответствующее минимуму невязки, как решение обратной оптической задачи. В работе I. Veselovskii с соавт. [9] производилось усреднение решений в окрестности этого минимума. В этой же работе были предложены критерии определения области усреднения. Проведенное сравнение результатов обработки одних и тех же лидарных данных алгоритмами Института тропосферных измерений (г. Лейпциг) и ЦФП

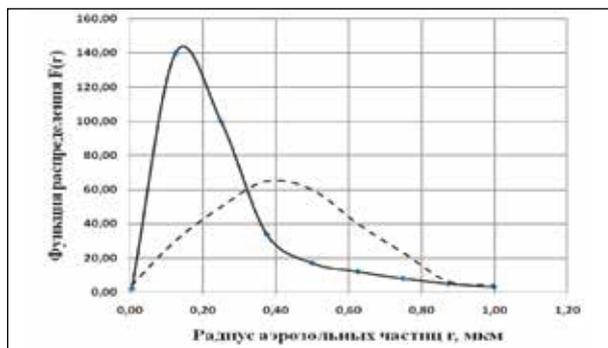


**Рисунок 8 – Алгоритм восстановления параметров функции распределения по дисперсному составу аэрозольных облаков V-газов методом многочастотного лазерного зондирования [8]**

ИОФ РАН с результатами забора локальных проб показало, что алгоритм ЦФП ИОФ РАН более устойчив и обеспечивает лучшую точность восстановления микроструктурных характеристик аэрозоля [1].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований специалистов ЦФП ИОФ РАН показывают, что для контроля параметров высокодисперсных аэрозолей неизвестного химического состава может успешно использоваться упрощенная версия лидара на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники. Такой лидар использует упругое рассеяние (355, 532, 1064 нм) и сигналы рамановского рассеяния азота воздуха (387, 607 нм). Соответственно могут быть определены 3 коэффициента обратного рассеяния и два коэффициента экстинкции ( $3\beta+2\alpha$  набор). Результаты теоретических исследований, приведенных в работах [8, 9], показывают, что даже в такой упрощенной конфигурации лидарный комплекс способен обеспечить достаточную точность оценки микроструктурных параметров высокодисперсного аэрозоля неизвестного химического состава. Этот теоретический результат нашел подтверждение при обработке экспериментальных данных многочастотного лазерного зондирования. Сравнение микроструктурных параметров аэрозоля, полученных из полного набора данных ( $6\beta+2\alpha$ ), с результатами обработки ограниченного набора ( $3\beta+2\alpha$ ) демонстрирует, что эти результаты согласуются между собой и находятся в хорошем соответствии с результатами локального контроля характеристик аэрозольных частиц [8].

Как правило, задача восстановления параметров аэрозоля ФАВ по данным лидарных измерений рассматривается при априорном предположении о логнормальном распределении аэрозольных частиц по дисперсному составу. Это обусловлено тем, что результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что в случае перевода жидкости в аэрозольное состояние путем дробления (взрыв, выливные авиационные при-

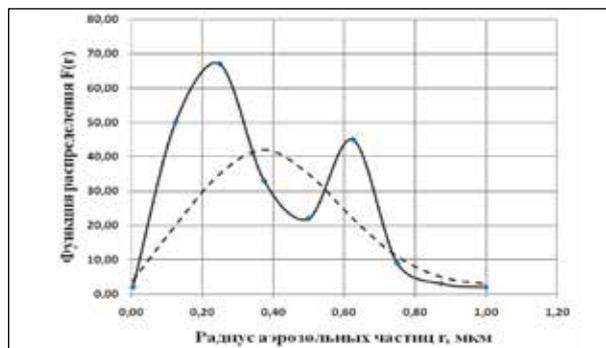


**Рисунок 9** – Пример восстановления мономодального аэрозольного распределения по дисперсности при зондировании на трех длинах волн [13]

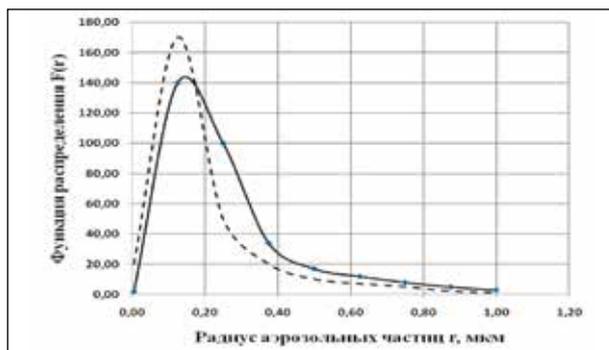
боры, дисковые аэрозольные генераторы, пневматические распылители и т. п.) образуются аэрозоли, дисперсный состав которых описывается логарифмически нормальным законом распределения частиц по размерам [10].

Однако анализ информационных материалов показывает, что существуют научно-технические предпосылки контроля микроструктурных характеристик аэрозольных систем, состоящих даже из двух и более фракций аэрозольных частиц. Оценка возможности использования метода регуляризации для восстановления бимодального распределения аэрозольных частиц по дисперсному составу при ограниченном наборе длин волн, доступных для зондирования, была исследована в работе I. Veselovskii с соавт. [9]. Численное моделирование проводилось для различных типов аэрозолей, соответствующих продуктам горения, промышленным выбросам, а также аэрозолю морского происхождения, при этом показатели преломления мелко- и крупнодисперсной фракций могли различаться. Результаты моделирования и экспериментальных измерений подтверждают, что и в этом случае параметры распределения могут быть определены с использованием ( $3\beta+2\alpha$ ) наборов входных данных. Одним из принципиальных результатов, полученных в работах [8, 9], является восстановление комплексного показателя преломления аэрозоля при совместном использовании коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции.

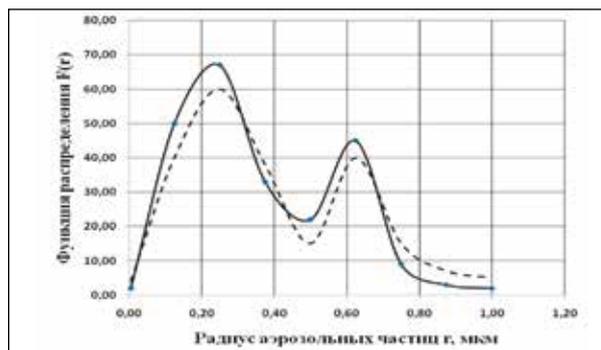
Альтернативным подходом к проблеме является рассмотрение информационной наполненности данных лидарного зондирования. Анализ информации, содержащейся в данных лидарных измерений, был впервые проведен в работе специалистов ЦФП ИОФ РАН, при рассмотрении линейной независимости спектров обратного рассеяния  $\beta(\lambda)$  и экстинкции  $\alpha(\lambda)$  аэрозоля [11]. Полученные результаты позволили оценить диапазон размеров частиц, в котором



**Рисунок 10** – Пример восстановления бимодального аэрозольного распределения по дисперсности при зондировании на трех длинах волн [13]



**Рисунок 11** – Пример восстановления мономодального аэрозольного распределения по дисперсности при зондировании на семи длинах волн [13]



**Рисунок 12** – Пример восстановления бимодального аэрозольного распределения по дисперсности при зондировании на семи длинах волн [13]

задача может быть решена, в зависимости от погрешностей входных данных лазерного зондирования. Такой подход дает представление о теоретически достижимой точности определения параметров аэрозоля ФАВ и позволяет исследовать эффект совместного использования коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции. При этом результаты анализа справедливы для любого алгоритма решения обратной оптической задачи. В другой работе I. Veselovskii с соавт. [11] показано также, что при 10 % погрешности измерений количество независимых компонент, содержащихся в вариациях  $\beta(\lambda)$  и  $\alpha(\lambda)$ , составляет три и два соответственно. Это означает, что измерение коэффициентов обратного рассеяния на трех длинах волн и экстинкции на двух при правильном выборе позволяет извлечь большую часть информации, которая в принципе доступна при многочастотном зондировании аэрозолей неизвестного химического состава и дисперсности. Данный результат объясняет, почему использование  $(3\beta+2\alpha)$  и  $(6\beta+2\alpha)$  наборов данных приводило к аналогичным результатам [1].

Специалистами ИОА СО РАН был проведен ряд теоретических и экспериментальных работ, направленных на разработку эффективных регуляризирующих алгоритмов и исследование возможностей многочастотного лазерного зондирования аэрозолей различного состава [12–14]. На рисунках 9–12 показаны результаты численного обращения данных трехчастотного и семичастотного зондирования аэрозоля [12]. По осям ординат отложено счетное значение концентраций аэрозольных частиц в  $1 \text{ м}^3$  атмосферного воздуха  $F(r)$ . Сплошные линии на рисунках (графиках) 6–9 соответствуют точному распределению аэрозоля по дисперсному составу, пунктирные – восстановленному.

Для решения подобной обратной задачи В.Е. Зуевым [13] был предложен итерационный метод. Метод позволяет обеспечивать восста-

новление функции  $F(r)$  в пределах 20 % ошибки. Проведенные математические исследования позволили сформулировать основные требования к многочастотным лидарным измерениям [13, 14]:

- ошибка оптических измерений для всех  $\lambda_i$  не должна превышать 5 %;
- мнимая часть комплексного показателя преломления вещества аэрозоля ФАВ должна быть  $\chi \leq 0,005$ ;
- ошибка в задании вещественной части комплексного показателя преломления должна находиться в пределах  $\pm 0,02$ .

При соблюдении этих требований метод многочастотного зондирования становится эффективным инструментом исследования дисперсного состава аэрозолей. Однако следует отметить, что итерационный метод обеспечивает восстановление параметров функции распределения по дисперсному составу при условии наличия априорной информации об оптических свойствах материала аэрозольных частиц.

Таким образом, анализ и обобщение имеющихся информационных материалов показывает, что в настоящее время созданы научно-технические предпосылки для расширения функциональных возможностей дистанционных средств химической разведки активного типа путем придания им функций измерительных систем параметров грубодисперсных аэрозолей ОБ и СДЯВ. Методические подходы к решению задачи восстановления микроструктурных параметров аэрозолей методами регуляризации по данным многочастотного лазерного зондирования, разработанные ведущими специалистами МГУ им. М.В. Ломоносова, ЦФП ИОФ РАН, ИОА СО РАН и ряда других НИУ РАН, позволяют усовершенствовать программно-математическое обеспечение подвижных лидарных комплексов военного назначения. Расширение функциональных возможностей лазерных систем разведки может обеспечить не только обнаружение и идентификацию об-

лаков различных ФАВ, но и контролировать изменение их микроструктурных параметров в динамике их распространения. Полученный объем информации может быть использован для прогноза масштабов заражения местности аэрозолями стойких ОВ

при применении химического оружия средствами авиации и уменьшить объемы химической разведки за счет более точного прогноза складывающейся химической обстановки в районе боевых действий.

#### **Информация о конфликте интересов**

Авторы заявляют, что исследования проводились при отсутствии любых коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

#### **Сведения о рецензировании**

Статья прошла открытое рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала.

#### **Список источников**

1. Веселовский И.А. Дистанционная лазерная диагностика аэрозольных и газовых составляющих атмосферы методами рамановского и упругого рассеяния: дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ИОФ РАН, 2005. 384 с.
2. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л. и др. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / Под общ. ред. Рождествина В.Н. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
3. Ansmann A., Riebesell M., Wandinger U. et al. Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosols extinction, and lidar ratio // Appl. Phys. 1992. V. 55. P. 18.
4. Григорьев А.А., Серебrenников Б.В. Способ дистанционного контроля дисперсного состава аэрозолей отравляющих веществ методом многочастотного лазерного зондирования в местах хранения и уничтожения отравляющих веществ при возникновении нештатных ситуаций // Докл. АВН. 2008. № 4. С. 63–69.
5. Патент РФ на изобретение № 2578105 (19.02.2016).
6. Большой энциклопедический словарь / Под ред. Кнунянца И.Л. М.: 1998. 207 с.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: 1974. 203 с.
8. Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V. et al. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 3685–3699.
9. Veselovskii I., Kolgotin A., Müller D. Retrieval of bimodal aerosol size distribution with multiwavelength Mie-Raman lidar / In: 6th International Symposium on Troposphere Profiling, Leipzig, Germany, September 14–20, 2003. P. 363–365.
10. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении // Докл. АН СССР. 1941. № 2. С. 36–41.
11. Veselovskii I., Kolgotin A., Müller D., Whiteman D.N. Information content of multiwavelength lidar data with respect to microphysical particle properties derived from eigenvalue analysis // Appl. Opt. 2005. V. 44. P. 5292–5303.
12. Наац И.Э. Некорректные обратные задачи лазерного зондирования атмосферных аэрозолей / В кн.: V Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 2. Томск, ИОА СО АН СССР, 1978.
13. Зуев В.Е. Оптический эксперимент и результаты обращения данных по многочастотному лазерному зондированию микроструктуры приземного слоя / В кн.: Проблемы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976.
14. Наац И.Э. Метод обратной задачи в атмосферной оптике. Новосибирск, 1986. 179 с.

#### **Об авторах**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Министерства обороны Российской Федерации. 412918, Российская Федерация, Саратовская обл., г. Вольск-18, ул. Краснознаменная, д. 1.

*Иноземцев Валерий Александрович.* Начальник института, канд. хим. наук.

*Григорьев Александр Александрович.* Ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук.

*Ефимов Игорь Николаевич.* Начальник отдела, канд. техн. наук.

*Позвонков Андрей Александрович.* Заместитель начальника отдела, канд. техн. наук.

*Солошин Андрей Сергеевич.* Младший научный сотрудник.

**Контактная информация для всех авторов:** 33cnii-fes@mil.ru  
**Контактное лицо:** Иноземцев Валерий Александрович; 33cnii-fes@mil.ru

## Main trends in the improvement of software of mobile laser remote chemical reconnaissance complexes

V.A. Inozemcev, A.A. Grigor'ev, I.N. Efimov, A.A. Pozvonkov, A.S. Soloshin

*Federal State Budgetary Establishment «33 Central Scientific Research Test Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation, 1 Krasnoznamennaya Street, Volsk-18, Saratov Region 412918, Russian Federation*

The contemporary level of the development of the theory of laser location and technical possibilities of lidar systems allows not only to solve certain problems of remote control of the optical properties of aerosol formations, but also to measure their concentrational characteristics and the parameters of the distribution function of the aerosol particles, using multi-frequency laser sensing. Because of that the remote means of chemical reconnaissance of active type with the function of measuring the parameters of aerosols of toxic substances and highly active toxic substances represent a new generation of such technologies. It is possible to give certain promising mobile lidar complexes of remote chemical reconnaissance special functions of measuring systems by introducing modern software and special algorithms for reversing lidar sensing data into macro- and microstructural characteristics of clouds of physiologically active substances (PhAS) in the atmosphere. This ensures control of the concentrations of multicomponental mixtures of PhAS, the parameters of the distribution function of the aerosol of PhAS by dispersion with the overlapping of isolines of the concentrations of the displayed PhAS on the terrain map. Mathematical studies allows us to formulate basic requirements for multi-frequency lidar measurements – optical measurement error for all  $\lambda_i$  should not exceed 5% - the imaginary part of the complex index of refraction of the substance of the aerosol of PhAS should be  $\chi \leq 0,005$  the error in specifying the real part of the complex refractive index must be within  $\pm 0,02$ . If these requirements are met, this sensing method becomes an effective tool for the study of the disperse composition of aerosols.

**Keywords:** active location; remote chemical reconnaissance; sounding; lidar complex; microstructure of cloud of physiologically active substance; return optical problem; software.

**For citation:** Inozemcev V.A., Grigor'ev A.A., Efimov I.N., Pozvonkov A.A., Soloshin A.S. Main Trends in the Improvement of Software of Mobile Laser Remote Chemical Reconnaissance Complexes // *Journal of NBC Protection Corps*. 2019. V. 3. № 1. P. 4–14.

### **Conflict of interest statement**

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationship that could be construed as a potential conflict of interest.

### **Peer review information**

The article has been peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board.

### **References**

1. Veselovsky I.A. Remote laser diagnostics of aerosol and gas components of atmosphere by Raman methods and elastic dispersion: Dis. Doc. Phys.-math. sciences. Moscow: IOF the Russian Academy of Sciences, 2005. 384 p. (in Russian).

2. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L. et al. Optiko-electronic systems of ecological monitoring of environment / Ed. Rozhdestvin V.N. Moscow: publ. MGTU of AD Bauman, 2002. 528 p. (in Russian).
3. Ansmann A., Riebesell M., Wandinger U. et al. Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosols extinction, and lidar ratio // Appl. Phys. 1992, V. 55. P. 18.
4. Grigorev A.A., Serebrennikov B.V. Method of remote control of disperse structure of aerosols of poison gases by a method of multifrequency laser sounding in places of storage and destruction of poison gases at occurrence of supernumerary situations // Reports Academy of military sciences. 2008. № 4. P. 63–69 (in Russian)
5. Patent RU № 2578105 (19.02.2016). (in Russian).
6. Big encyclopaedic dictionary / Ed. Knunjantsa I.L. Moscow: 1998. 207 p. (in Russian).
7. Tihonov A.N., Arsenin V.J. Methods of the decision of incorrect problems. Moscow: 1974. 203 p. (in Russian).
8. Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V. et al. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 3685–3699.
9. Veselovskii I., Kolgotin A., Müller D. Retrieval of bimodal aerosol size distribution with multiwavelength Mie-Raman lidar // In: 6-th International Symposium on Troposphere Profiling, Leipzig, Germany, September 14–20, 2003. P. 363–365.
10. Kolmogorov A.H. About logarithmically normal law of distribution of particles at crushing // Reports AH the USSR. 1941. № 2. P. 36–41 (in Russian).
11. Veselovsky I.A., Kolgotin A., Müller D., Whiteman D.N. Information content of multiwavelength lidar data with respect to microphysical particle properties derived from eigenvalue analysis // Appl. Opt. 2005. V. 44. P. 5292–5303.
12. Naats I.E. Incorrect return problems of laser sounding of atmospheric aerosols: In book V All-Union symposium on laser and acoustic sounding of atmosphere. Chapter 2. Tomsk: IOA CO AN the USSR, 1978. (in Russian).
13. Zuev V.E. Optical experiment and results of the reference of the data on multifrequency laser sounding of a microstructure of a ground layer: In book: Problems of remote sounding of atmosphere. Tomsk: IOA CO AN the USSR, 1976 (in Russian).
14. Naats I.E. A method of a return problem in atmospheric optics. Novosibirsk: 1986. 179 p. (in Russian).

#### *Authors*

Federal State Budgetary Establishment «33 Central Scientific Research Test Institute» of the Ministry of Defence of the Russian Federation, 1 Krasnoznamennaya Street, Volsk-18, Saratov Region 412918, Russian Federation  
*Valeriy Alexandrovich Inozemcev.* Head of the Institute, Candidate of Chemical Sciences.  
*Alexandr Alexandrovich Grigor'ev.* Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences.  
*Igor' Nikolaevich Efimov.* Head of Department, Candidate of Technical Sciences.  
*Andrey Alexandrovich Pozvonkov.* Deputy Head of Department, Candidate of Technical Sciences.  
*Andrey Sergeevich Soloshin.* Junior researcher.

**Contact information for all authors:** 33cnii-fes@mil.ru  
**Contact person:** Inozemcev Valeriy Alexandrovich; 33cnii-fes@mil.ru