

УДК 551.510: 551.521.3

© В. В. Акулиничев, И. В. Курнин, Е. Г. Курочкина

## ЛИДАР С БЕЗОПАСНЫМ ДЛЯ ЗРЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ

На основе Ег-лазера с излучением, безопасным для глаз (длина волны излучения 1.54 мкм), создан лидар, предназначенный для детектирования дымов и других примесей в воздухе. Показано, что в зависимости от рассеивающих свойств дыма возможна его регистрация на расстояниях до 10–12 км.

### ВВЕДЕНИЕ

С появлением лазеров и построенных на их основе приборов дистанционного контроля нового типа — лидаров (от английского. *Light Detection and Ranging*) появилась возможность решения различных экологических задач, связанных с дистанционным контролем окружающей среды. Области применения таких лидаров являются: наблюдение атмосферных взвесей; неспецифическая идентификация аэрозолей, других примесей, прозрачных или не отражающих в радиочастотном диапазоне; определение их физико-химических характеристик; обнаружение летучих взвесей техногенного или природного происхождения (дымы, производственные выбросы); обнаружение в воздухе различных объектов (стаи птиц, воздушные зонды); высокоточная дальнометрия и т.д. И конечно, одной из самых актуальных задач является раннее обнаружение лесных пожаров и их повторных возгораний [1, 1а, 2].

Развитие лазерной техники позволило использовать для таких лидарных систем излучение, относительно безопасное для глаза человека, например с длиной волны 1.54 мкм. Существуют различные способы получить такое излучение: параметрическая генерация [3], вынужденное комбинационное рассеяние в сжатом метане импульсов Nd:YAG-лазера [4] или использование в качестве активного элемента лазера Ег-стекла [5]. Так как первые два варианта дают импульсы существенной нестабильности, то наиболее предпочтительным представляется третий.

Для решения таких задач предназначена лидарная система, разработанная и созданная в ИАнП РАН совместно с ООО "Мультитех" [6]. Отличительными особенностями этой системы являются: невидимый и безопасный для зрения инфракрасный диапазон излучения лазерного источника; компактность и легкость всей конструкции, которые делают ее наиболее пригодной для оперативного экологического мониторинга, требующего использования портативных и переносных установок, исключающих возможность травм и пораже-

ний обслуживающего персонала и посторонних лиц.

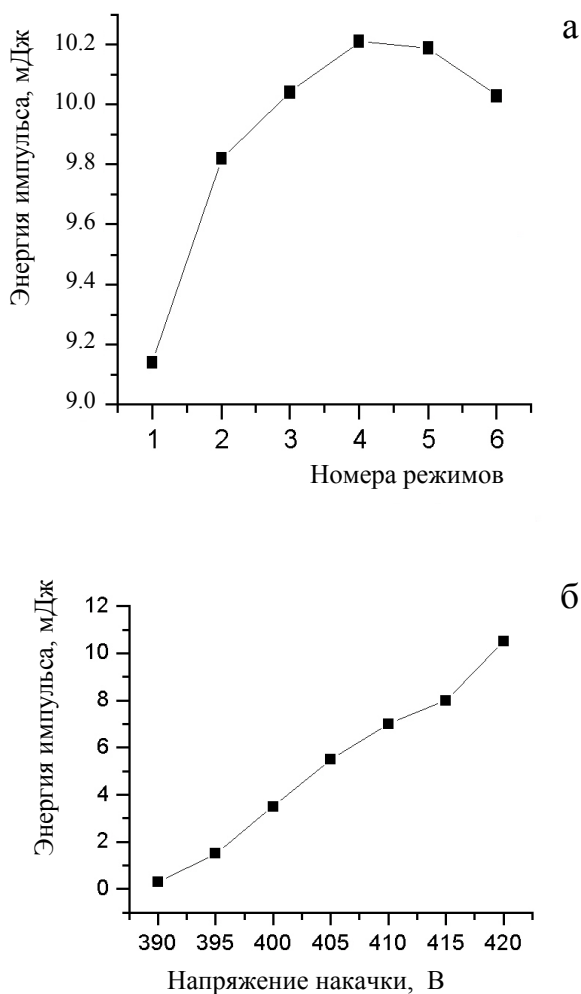
В состав устройства входит лазерная система LID-Eg (источник лазерного излучения с блоком питания), система приема и регистрации рассеянного лазерного излучения, состоящая из телескопической оптической системы, фотоприемника и системы визуального наведения на объект. Задачи мониторинга окружающей среды, как правило, не требуют применения излучателей с высокой частотой повторения импульсов, что позволило отказаться от системы принудительного охлаждения лазерной головки. Это существенно повысило компактность лазерного блока. Отраженное от объекта или рассеянное лазерное излучение с длиной волны около 1.5 мкм попадает в приемный тракт (телескопическая система). После прохождения приемника (лавинный фотодиод) сигнал поступает на аналогово-цифровой преобразователь (ПУПСИК) и обрабатывается на ПК в реальном масштабе времени.

### ЛИДАРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА LID-Eg

Лидарная лазерная система LID-Eg состоит из компактного источника лазерного излучения и блока питания (LID-Eg Driver), позволяющего осуществлять простое и надежное управление излучателем. Источник питания допускает дистанционное управление лазером от ПК через интерфейс.

Источник излучения представляет собой твердотельный лазер с ламповой накачкой. Активный элемент лазера — эрбиевое стекло. Длина волны излучателя — 1.54 мкм лежит в диапазоне, безопасном для зрения человека.

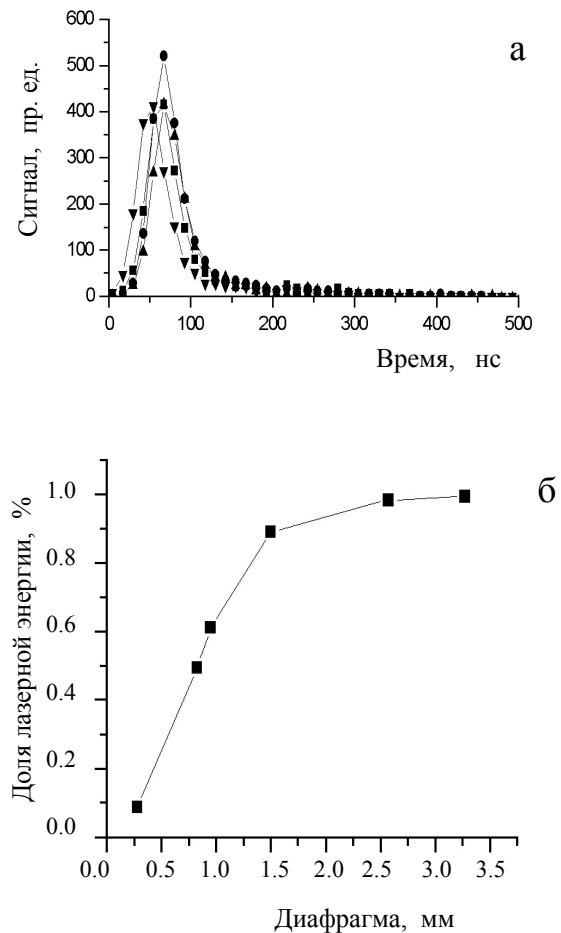
Лазер управляется затвором на вращающейся призме. В процессе работы сигнал с вращающегося затвора периодически поступает на источник питания, который вырабатывает импульс запуска лазера. Внутри блока лазера расположен дополнительный контрольный фотодиод, который в момент выработки лазерного импульса посылает



**Рис. 1.** Зависимость энергии импульса лазера а — от режимов вращения призмы, модулирующей лазерное излучение; б — от напряжения накачки

сигнал на источник питания. Этот же сигнал играет роль импульса синхронизации. Зависимости энергии выходного импульса от параметров (режимов) вращения призмы и напряжения накачки представлены на рис. 1, а и б. Энергия лазерного импульса измерялась калориметром ИМО-2Н. Длительность генерируемого импульса и его расходимость представлены на рис. 2, а и б. Расходимость лазерного излучения определялась методом диафрагм.

Низкая частота следования выходных импульсов определяет малое тепловыделение излучателя, что позволяет ограничиться естественным охлаждением лазера и отказаться от установки охлади-



**Рис. 2.** Параметры лазерного импульса: а — длительность, б — расходимость

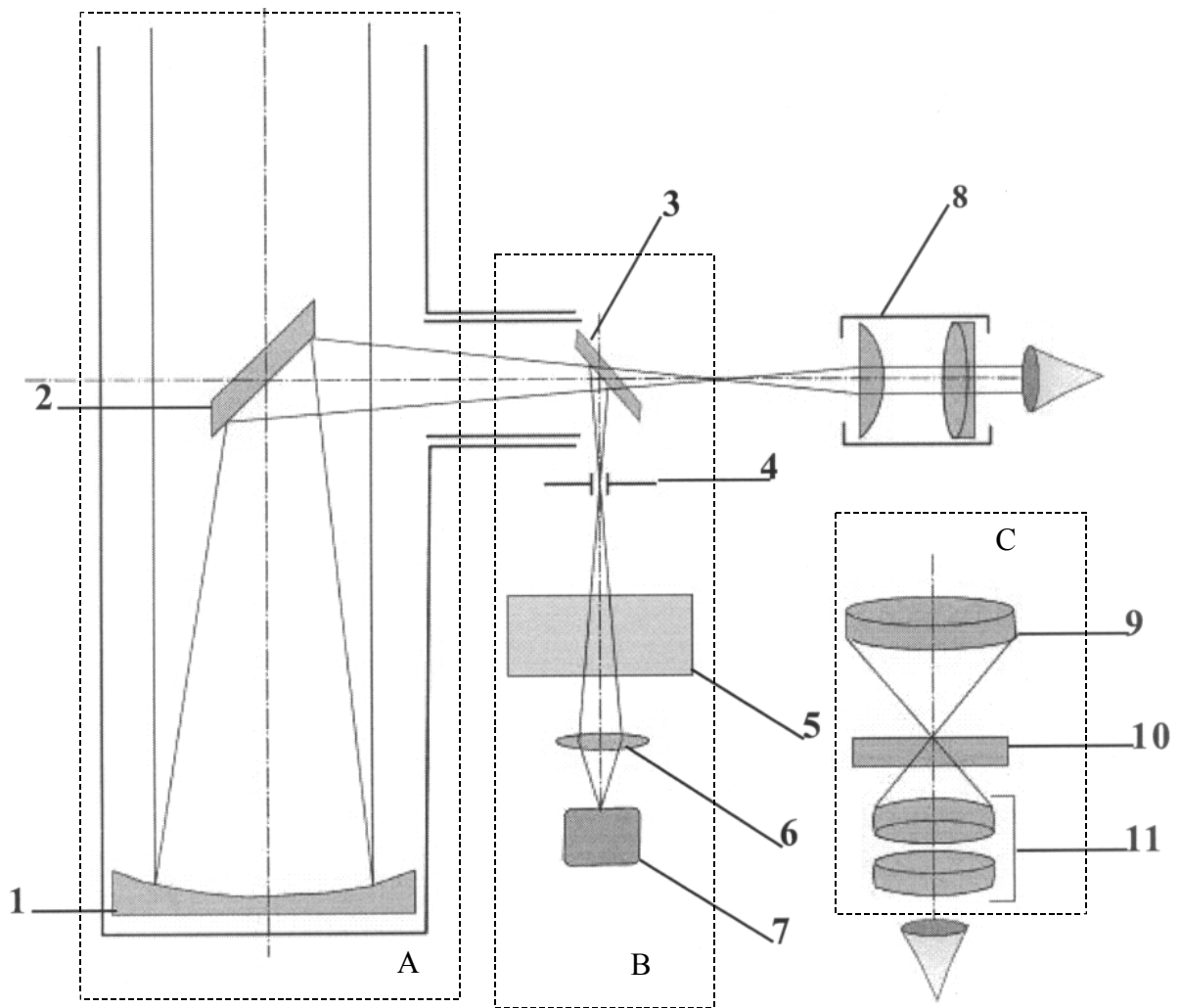
тельных систем. Это дает возможность расположить накопительные конденсаторы, разрядную цепь и лампу накачки в одном компактном корпусе, что существенно снижает влияние радиопомех.

В лазерной головке помещается также вспомогательный диодный лазер с автономным питанием от батарейки и выключателем, который создает луч-пилот для наведения и юстировки лидара.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ

### Лазерная головка

Длина .....	152 мм
Ширина .....	80 мм
Высота .....	45 мм
Масса .....	0.5 кг



**Рис. 3.** Схема приемной системы лидара.

А — труба телескопа с главным зеркалом и наклонным зеркалом.

В — система регистрации с полупрозрачным зеркалом, светофильтром, фокусирующей линзой и фотоприемником.

С — система визуального наведения на объект.

1 — главное зеркало, 2 — наклонное зеркало, 3 — дихроичное наклонное зеркало, 4 — диафрагма, 5 — узел светофильтра, 6 — фокусирующая линза, 7 — узел фотоприемника, 8 — окуляр визуального канала приемной системы, 9 — объектив системы визуального наведения, 10 — визирная сетка, 11 — окуляр

Длина волны излучения..... 154 мкм  
 Максимальная энергия импульса ..... 12 мДж  
 Длительность импульса ..... ~ 30 нс  
 Максимальная частота следования .. 5 имп /мин  
 Теоретическая дифракционная  
 расходимость пучка ..... 3.76 мрад  
 Реальная расходимость пучка (90 %).. 3.84 мрад

Импульсный источник питания (ИП) LID-Eg позволяет осуществлять питание и управление всеми функциями лазерной головки лидарного комплекса. Питание ИП осуществляется стандартным сетевым напряжением 220 В, 50/60 Гц или постоянным напряжением 12 В. ИП состоит из зарядного устройства и микропроцессорной системы

б

управления вращением призмы. ИП оснащен блоками светодиодной индикации работы лазера и возможных неисправностей, возникающих в процессе его работы, а также жидкокристаллическим дисплеем, с помощью которого контролируются и задаются необходимые параметры выходного сигнала.

#### Параметры блока питания LID-Er

Длина.....	250 мм
Ширина.....	190 мм
Высота.....	80 мм
Масса.....	2 кг
Напряжение питания ИП.....	~220 В, 50/60 Гц,
	..... +12 В

#### Приемная система

Приемная система лидарного комплекса выполнена на базе телескопа ТАЛ-1. В состав телескопа конструктивно входит система визуального наведения. Рассеянное лазерное излучение фокусируется телескопом на приемник (лавинный фотодиод ЛФД-2) с коэффициентом усиления предусилителя 100 и полосой частот пропускания усилителя 30 МГц. Для визуального наблюдения и юстировки лидара с системой фотоприема совмещен объектив с фокусным расстоянием 25 мм. Схема приемной системы представлена на рис. 3.

#### Телескоп ТАЛ-1

Телескоп ТАЛ-1 состоит из следующих основных частей:

- телескоп;
- система визуального наведения, 6<sup>×</sup>;
- окуляр,  $f=25$  мм, 1.25";
- штатив с поворотной системой;
- опора телескопа;
- суппорты (3 шт.).

Параметры телескопа:

Диаметр главного зеркала.....	110 мм
Дифрагменное число	
главного зеркала.....	$f/7.3$
Фокусное расстояние.....	805 мм
Увеличение с 25 мм окуляром.....	32 <sup>×</sup>
Увеличение с 15 мм окуляром.....	54 <sup>×</sup>
Телесный угол (при увеличении 32 <sup>×</sup> )..	28 мрад
Телесный угол (при увеличении 54 <sup>×</sup> )..	1.4 мрад
Разрешение.....	1.3"
Угол зрения системы наведения.....	8
Увеличение системы наведения.....	6 <sup>×</sup>

Габариты телескопа:

Длина.....	885 мм
Ширина.....	800 мм
Высота в рабочем положении.....	1650 мм
Масса не более.....	20 кг

#### ПРИМЕНЕНИЕ ЛИДАРНОЙ СИСТЕМЫ

Для предварительного тестирования созданной лидарной системы исследовались импульсы, отраженные от дымящей трубы, расположенной на известном расстоянии. Полученные сигналы представлены на рис. 4, а (в ясную погоду) и б (во время снегопада). Во втором случае отчетливо виден сигнал от падающего снега.

Возможности созданной лазерной системы можно проанализировать теоретически. Мощность отраженной лазерной энергии, дошедшая до приемной системы лидара, представляется выражением [7]

$$P_r = E_l \cdot (c \cdot \pi \cdot D^2 / 8R^2) \cdot \tau_{RX} \cdot \tau_{TX} \times \exp(-2 \int_0^R \alpha(r) dr) \cdot \langle \beta(R) \rangle, \quad (1)$$

где  $E_l$  — выходная энергия лазерного импульса,

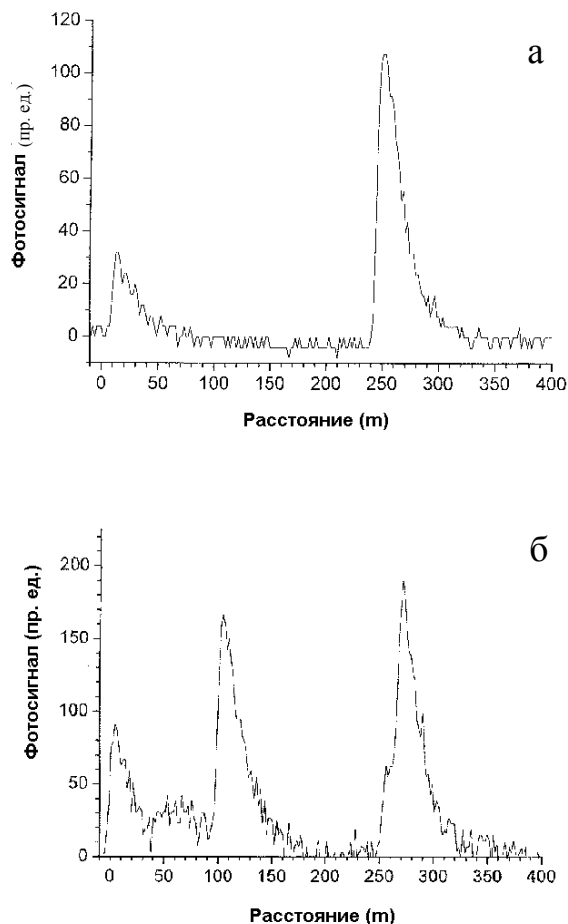


Рис. 4. Тестовая регистрация сигнала лидара а — при ясной погоде, б — при снегопаде

$c$  — скорость света,  $\langle\beta(R)\rangle$  — средний коэффициент рассеяния назад на пути распространения луча до расстояния  $R$ ,  $D$  — диаметр эффективной площадки приемника,  $\tau_{TX}$  и  $\tau_{RX}$  — соответственно эффективности излучателя и приемника, а  $\alpha$  — коэффициент поглощения. Отношение сигнал/шум (SNR) представляется выражением [8]

$$\text{SNR} = \frac{P_{sig}}{P_{th} + P_a + P_{dark} + P_{shot} + P_{back}}, \quad (2)$$

где  $P_{sig}$  — мощность детектируемого электрического сигнала,  $P_{th}$  — мощность тепловых шумов,  $P_a$  — мощность шумов усилителя,  $P_{dark}$  — мощность темнового тока,  $P_{shot}$  — мощность дробового шума,  $P_{back}$  — мощность фоновой засветки. Выражения для  $P_{sig}$ ,  $P_{th}$ ,  $P_a$ ,  $P_{dark}$ ,  $P_{shot}$ ,  $P_{back}$  приводятся в [7, 8]. Поскольку выражение (2) характеризует способность приемной системы выделить пришедший сигнал, а (1) определяет мощность этого сигнала, то отсюда можно определить условия обнаружения в зависимости от рассеивающих свойств объекта и расстояния до него. Для параметров нашего лидара получаются следующие результаты. Фиксируем для надежного обнаружения сигнала SNR на уровне 10. Для значений коэффициента рассеяния  $\beta$ :

$\beta = 1.2 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1} \text{ стер}^{-1}$  — для случая горения нефти со средней концентрацией частиц продуктов горения  $1.3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  размером 0.12 мкм [9];

$\beta = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1} \text{ стер}^{-1}$  — для случая горения древесины со средней концентрацией частиц продуктов горения  $3.8 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  размером 0.19 мкм [10];

$\beta = 6.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \text{ стер}^{-1}$  — для случая горения древесины со средней концентрацией частиц продуктов горения  $3.8 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  размером 0.12 мкм [11];

$\beta = 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1} \text{ стер}^{-1}$  — для случая горения древесины со средней концентрацией частиц продуктов горения  $1.9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  размером 0.05 мкм [10] — находим в зависимости от расстояния до объекта величину превышения регистрируемого сигнала над минимально возможным для обнаружения (см. таблицу).

Отношение уровней регистрируемого сигнала лидара к минимально обнаруживаемому

$R$ , км	$\beta$ , $\text{м}^{-1} \text{ стер}^{-1}$			
	$1.2 \cdot 10^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$
1.5	1914	207	105	5.7
3	354	38	20	1.1
5	85	9.2	4.7	0.26
12	3.7	0.4	0.2	0.01

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемая лидарная система может быть использована для дистанционного обнаружения на местности локализованных в пространстве летучих взвесей (дым пожаров, производственные выбросы), неспецифической индикации аэрозолей, обнаружения вне зависимости от времени суток в воздухе объектов (стаи птиц, воздушные зонды). Дальность действия лидара может составлять 10–12 км в зависимости от параметров регистрируемого объекта и погодных условий. Невидимый и безопасный для зрения инфракрасный диапазон излучения, вырабатываемого лазерным источником, компактность и легкость всей конструкции делают ее наиболее пригодной для оперативного экологического мониторинга, требующего использования портативных и переносных установок, исключающих возможность травм и поражений обслуживающего персонала и посторонних лиц.

Авторы выражают искреннюю и глубокую благодарность проф. Р. Вилару (Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal) и д-ру А.В. Лаврову (РНИЦ "Прикладная химия", Санкт-Петербург, Россия).

Работа выполнена при поддержке фонда INTAS, грант INTAS-99-1634.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vilar R., Lavrov A. // Proc. SPIE. 1999. V. 3868. P. 473–485.
- 1a. Vilar R., Lavrov A. // Appl. Phys. 2000. V. B71. P. 225–229.
2. Utkin A., Lavrov A., Costa L., Simoes F., Vilar R. // Appl. Phys. 2002. V. B74. P. 77–83.
3. Overbeck J.A., Salisbury M.S., Mark M.B., Watson E.A. // Appl. Opt. 1995. V. 34. P. 7724–7729.
4. Акулиничев В.В., Горбунов В.А., Пивинский Е.Г. // Квант. электроника. 1997. Т. 24. С. 362–366.
5. Garnish W., Trickl T. // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 3324–3329.
6. <http://www.laser-design.com>
7. Youmans D.G., Garner R., Peterson K.R. // Industrial Application of Laser Radar / Ed. by Kamerman G.W., Keicher W.E. (Proc. SPIE). 1994. V. 2271. P. 13–28.
8. Yariv A. Optical Electronics. Sanders College Publishing. 1991.
9. Benech B., Dinh P.V., Ezcirra A. // Atmos. Envir. 1988. V. 22. P. 1071–1078.
10. Hueglin C., Gaegauf C., Kunzel S., Burtscher H. // Environ. Sci. Technol. 1997. V. 31. P. 3439–3444.
11. Stith J.L., Radke L.F., Hobbs P.V. // Atmos. Environ. 1981. V. 15. P. 73–81.

**Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург**

Материал поступил в редакцию 12.08.2002.

**EYE-SAFE LIDAR****V. V. Akulinichev, I. V. Kurnin, E. G. Kurochkina***Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

A LIDAR system based on Er-laser with eye-safe radiation (the wavelength is 1.54  $\mu\text{m}$ ) has been created and tested for smoke and other pollution in air. Both theoretical estimations and preliminary experiments show that the needed signal registration may be possible at 10–12 km depending on smoke scattering parameters.