

## **Дистанционное зондирование облачного покрова фемтосекундным лидаром**

П.А. Бабушкин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). 634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1. bra@iao.ru*

В работе представлены качественные результаты дистанционного зондирования облачного покрова над Академгородком, Томск фемтосекундным лидаром. Проведено уточнение некоторых параметров уравнения лазерного зондирования для фемтосекундного лидара с учетом отличительных особенностей эффектов самовоздействия.

A qualitative results of clouds remote sensing above Akademgorodok, Tomsk by femtosecond lidar are presented in the paper. A some parameters of lidar equation for femtosecond lidar with considering the distinctive features of self-action effects were clarify.

### **Введение**

Роль облаков в жизнедеятельности человека огромна. Они участвуют в процессе круговорота воды в природе, радиационных процессах Земля – атмосфера. И, несмотря на громадные успехи технического развития, хозяйственная деятельность человечества находится под заметным влиянием климатических условий, которые формируются благодаря облакам.

Наравне с облаками важным фактором, влияющим на хозяйственную деятельность и здоровье человека, является наличие в атмосфере аэрозоля. Присутствующие в атмосфере аэрозоли различной формы, размера и происхождения могут выступать в качестве ядер конденсации или оледенения в облаках.

Наличие аэрозоля в атмосфере неизбежно, но увеличение его концентрации может зависеть как от естественных процессов (выветривание, извержение вулканов и прочее), так и от процессов антропогенного характера, что в свете последних десятилетий становится все более актуальной проблемой.

Атмосферный аэрозоль (АА) принимает участие в инсоляции Земной поверхности благодаря поглощению и рассеянию солнечного излучения. В связи с этим увеличение концентрации АА может способствовать развитию как похолодания, так и потепления [1].

В настоящее время активно ведутся исследования возможностей применения тераваттного излучения фемтосекундных лазеров в задачах зондирования АА. Фемтосекундный лазер становится перспективным инструментом [2] для изучения состава и свойств атмосферы, что можно объяснить наличием нелинейных эффектов при распространении его излучения, которые расширяют возможности диагностики исследуемого объекта. Важным звеном исследований взаимодействия тераваттного импульсного излучения с аэрозольно-газовой атмосферой является изучение нелинейных атмосферно-оптических эффектов.

### **Основная часть**

Дистанционное зондирование с помощью фемтосекундного излучения привлекательно тем, что в процессе распространения, излучение, взаимодействуя с аэрозольно-газовой средой, вызывает такие эффекты, как самофокусировка, филаментация, генерация излучения конической эмиссии суперконтинуума (СК). Благодаря генерации излучения СК, которое представляет собой сверхуширение частотного спектра в стоксову и антистоксову области, появляется принципиально

новая возможность увеличения информативности многочастотного дистанционного лазерного зондирования АА. Источником излучения СК является филамент, который рождается в результате преобладания Керровской нелинейности над остальными видами нелинейности.

Формирование сигналов обратного рассеяния в режиме многочастотного зондирования излучением СК не удовлетворяет линейному уравнению лазерной локации, что затрудняет его решение.

Приведем здесь обычное уравнение лазерного зондирования для однократного рассеяния

$$P(z) = P_0 \frac{A_0}{z^2} \xi \beta_\pi(z) G(z) \frac{c\tau_n}{2} T^2(z), \quad (1)$$

где  $P_0$  - исходная мощность лазерного излучения;

$\frac{A_0}{z^2}$  - телесный угол, в котором осуществляется прием сигналов оптической системой;

$\xi$  - коэффициент пропускания оптических элементов лидарной системы;

$\beta_\pi(z) = \frac{\sigma}{4\pi} \chi_\pi(z)$  - объемный коэффициент обратного рассеяния;  $\sigma$  - коэффициент рассеяния;  $\chi_\pi(z)$  - относительное угловое распределение света, рассеянного единичным объемом взвешенных в воздухе частиц в направлении назад - индикатриса рассеяния для угла  $180^\circ$ ;

$G(z)$  - геометрический фактор лидара;

$\tau_n$  - длительность импульса;

$c$  - скорость света;

$T^2(z) = \exp(-2 \int_0^z \alpha(z) dz)$  - интегральное пропускание;  $\alpha(z)$  - коэффициент ослабления атмосферы для лазерной длины волны.

Рассматривая дистанционное зондирование излучением СК, стоит перейти к системе уравнений лазерного зондирования, записанных для каждой из длин волн СК. Тогда, в самом простейшем виде, уравнение зондирования СК будет записано, как уравнение многочастотного зондирования, описанное в [3]

$$P(z, \lambda_i) = P_0(\lambda_i) \frac{A_0}{z^2} \xi(\lambda_i) \beta_\pi G(z, \lambda_i) \frac{c\tau_n}{2} T^2(z, \lambda_i), \quad (2)$$

где  $P_0(\lambda_i)$  - исходная мощность излучения на длине волны суперконтинуума;

$\frac{A_0}{z^2}$  - телесный угол, в котором осуществляется прием оптической системой излучения обратного рассеянного от суперконтинуума;

$\xi(\lambda_i)$  - коэффициент пропускания оптических элементов лидарной системы на длинах волн суперконтинуума;

$\beta_\pi$  - объемный коэффициент обратного рассеяния;

$G(z, \lambda_i)$  - геометрический фактор лидара в зависимости от длины волны суперконтинуума;

$\tau_n$  - длительность импульса;

$c$  - скорость света;

$T^2(z, \lambda_i) = \exp(-2 \int_0^z \alpha(z, \lambda_i) dz)$  - интегральное пропускание для спектра суперконтинуума;

$\alpha(z, \lambda_i)$  - коэффициент ослабления атмосферы для длин волн суперконтинуума.

Тем не менее, это уравнение необходимо доопределить относительно особенностей формирования и распространения филамента и самого излучения СК.

При составлении УЛЗ для СК необходимо учесть распределение мощности излучения по спектру СК, а именно в излучении из зоны филаментации (по направлению распространения) всего лишь несколько процентов составляет излучение конической эмиссии СК (в видимой области спектра). На видимую область спектра СК приходится порядка 2÷3%, а на ИК область 4÷5%. По результатам эксперимента [4] (рис.1) порядка 93% энергии СК (включая лазерные длины волн) сконцентрировано в приосевой части импульса.

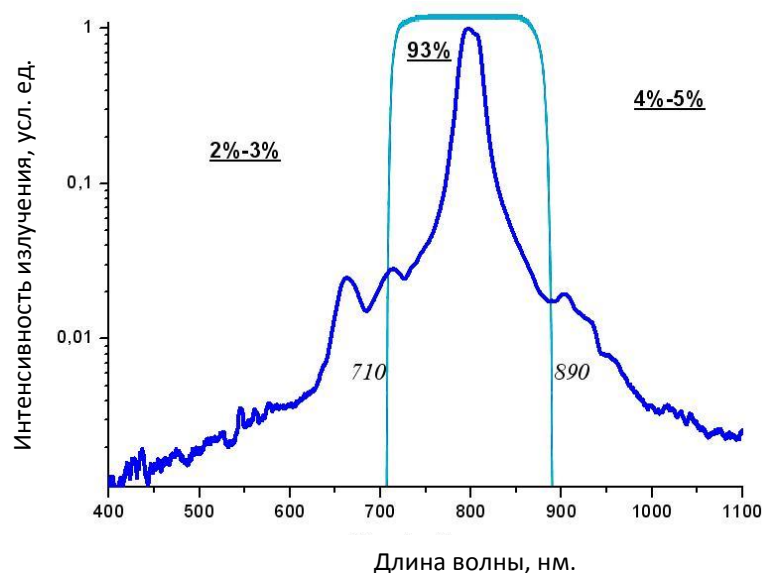


Рис. 1. Спектр излучения СК в филаментированном импульсе [4].

На основании данных эксперимента [4] распределение интенсивности при генерации СК следующее: 0,4 мкм –  $0,001P_{изл}$ ; 0,5 мкм –  $0,02P_{изл}$ ; 0,55 мкм –  $0,04P_{изл}$ ; 1,1 мкм –  $0,012P_{изл}$  ( $E=20$  мДж;  $\tau=40$  фс;  $P_{изл}=0,5$  ТВт).

В коротковолновой части спектра можно выделить локальные максимумы, соответствующие кольцевой структуре конической эмиссии СК. Часть коротковолнового излучения СК распределяется в виде конусов по правилу: чем короче длина волны, тем больше угол при вершине конуса - коническая эмиссия СК (КЭ СК).

Филамент формируется на некотором расстоянии от системы, что требует сделать поправку в УЛЗ на расстояние самофокусировки. Для этого воспользуемся формулой Марбургера [5], которая была получена на основе большого числа экспериментов и позволяет оценить положение точки филаментации

$$Z_{\phi} = \frac{2L_R 0,367}{\sqrt{(\sqrt{\eta} - 0,852)^2 - 0,0219}}, \quad (2)$$

где  $L_R = k \frac{a_0^2}{2}$  – дифракционная длина исходного пучка;

$\eta = \frac{P_{изл}}{P_{кр}}$  – безразмерная величина;

$k$  – волновое число,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;

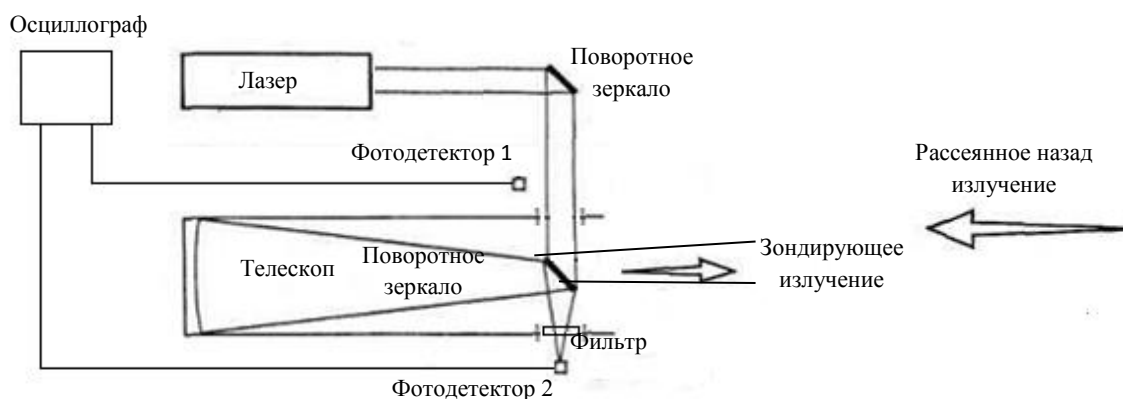
$a_0$  – радиус пучка;

$P_{изл}$  – мощность лазерного излучения;

$P_{кр} = \frac{3,77\lambda^2}{(8\pi n_0 n_2)}$  – критическая мощность для гауссова пучка.

Участок самофокусировки исключается из рассмотрения, так как зондируемое излучение распространяется и рассеивается, соответственно, не от самой системы, а на некотором расстоянии. На этом основании, в уравнении лазерного зондирования переобозначим переменную  $z$ , как  $R=z-Z_{\phi}$ .

На рис. 2 приведена схема фемтосекундного лидарного стенда, с помощью которого проводилось зондирование облачности под углом  $30^\circ$  над городом Томск в марте 2017 года. Использовались такие параметры системы как,  $\tau_0=40 \cdot 10^{-15}$  с;  $E_0=20 \cdot 10^{-3}$  Дж;  $a_0=1,25 \cdot 10^{-2}$  м, участок самофокусировки по нашим оценкам составляет 48 м.

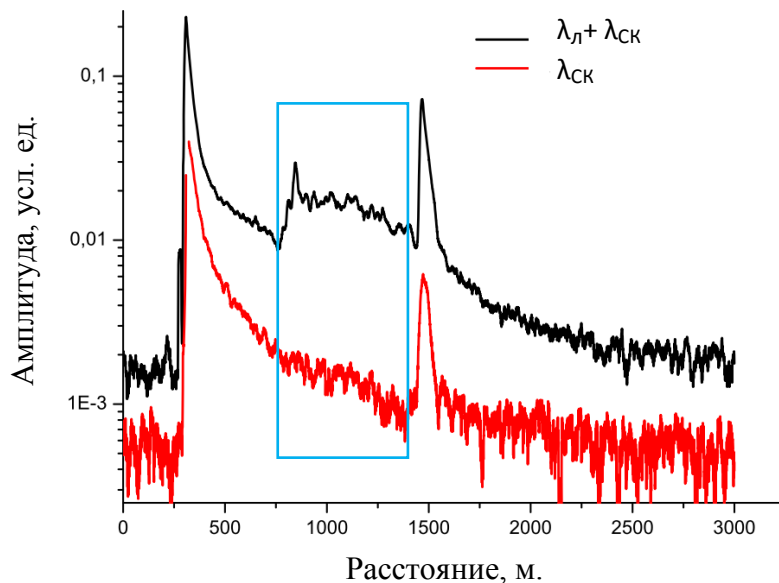


**Рис. 2. Блок схема фемтосекундного лидара.**

В качестве источника излучения использована фемтосекундная лазерная система состоящая из лазера накачки регенеративного усилителя Lotis LS-2131M, лазера накачки многопроходового усилителя SOLAR-LQ829, которая предназначена для генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов длительностью 25-55 фс и энергией  $(5 \div 100) \cdot 10^{-3}$  Дж на длине волны  $\lambda=800 \pm 50$  нм и частотой повторения импульса  $f_{\text{пов.им}}=10$  Гц.

Выходное излучение для передачи в атмосферу направлено через поворотное зеркало на поворотное зеркало телескопа. Телескоп системы Ньютона с фокусным расстоянием 80 см и диаметром главного зеркала 30 см. Схема зондирования коаксиальная. Выбор коаксиальной схемы зондирования обеспечил исключение участка самофокусировки, который характеризуется излучением обратного рассеяния высокой интенсивности, который может привести к порче приемной оптики. Для регистрации интересующих стоксового и антистоксового частей спектра, относительно основной длины волны, поставлен фильтр СЗС 23 и ФЭУ 62.

На рис. 3 приведены запись лидарных сигналов обратного рассеяния на лазерной  $\lambda_{\text{л}}$  и длинах волн СК  $\lambda_{\text{СК}}$ . Излучение обратного рассеяния, представленное черным графиком, содержит в себе не только лазерную длину волны  $\lambda=800 \pm 50$  нм, но и спектр длин волн суперконтинуума, который в антистоксовой и стоксовой части спектра относительно лазерной длины волны простирается до УФ и ИК соответственно.



**Рис. 3. Запись сигнала обратного рассеяния при зондировании фемтосекундным лидаром.**

Легко убедиться в том, черной кривой представлена запись сигнала обратного рассеяния на длинах волн  $\lambda_l + \lambda_{СК}$ , посмотрев на красный график, который представляет собой запись того же сигнала, но через фильтр СЗС 23, который активно пропускает излучение на длинах волн  $300 \div 750$  нм и  $1000 \div 2000$  нм, не пропуская излучение на основной длине волны лазера  $800 \pm 50$  нм. Выделенная на рисунке синим прямоугольником область также дает наглядное представление об успешном подавлении лазерной длины волны, так как при сравнении сигналов с этих участков мы можем говорить об отсутствии вклада в процесс рассеяния на лазерной длине волны.

Приведенные лидарные сигналы позволяют говорить о наличии на высотах  $750 \div 1400$  м слоисто-кучевой облачности (St), высота основания которой  $0,5 - 1,5$  км. Протяженность слоя  $0,2 - 0,8$  км. На участке  $1400 \div 1650$  м возможно также наличие слоисто-кучевой облачности кучевообразного развития, что можно объяснить большей оптической плотностью чем в предыдущем случае.

### **Заключение**

Как известно, одночастотные лидары способны дать лишь качественную информацию об исследуемом объекте. Используя несколько длин волн – многочастотное зондирование появляется возможность расширить диапазон получаемой информации об АА.

На основе фемтосекундных лазерных систем продолжают создаваться новые методы исследования окружающей среды, атмосферы. В связи с этим остается актуальной проблема реализации метода многочастотного лазерного зондирования на основе таких явлений как, самофокусировка, филаментация и генерация конической эмиссии СК, которые одновременно позволяют реализовать источник излучения СК и перемещать его вдоль трассы зондирования в определенных значениях.

Уточнение параметров УЛЗ для фемтосекундного лидара и развитие метода многочастотного зондирования на длинах волн СК есть дальнейшая цель работы автора.

### Литература

1. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Ленинград.:Гидрометеоздат. 1980. 352 с.
2. Кандидов В.П., Шленов С.А., Силаева Е.П., Дергачев А.А. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и ее приложения в атмосферной оптике // Оптика атмосферы и океана. 23, № 10. 2010. С. 873-884
3. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. - 242 с.
4. Babushkin P.A., Burnashov A.V., Iglakova A.N. and others. Some results of the propagation of the high-power terawatt femtosecond laser radiation in different media // *Proc. SPIE* 9810, International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XII, 98100K (December 15, 2015); doi:10.1117/12.2224928.
5. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // *Progress in Quantum Electronics*. 1975. Vol. 4. No. 01.P. 35-110.