

## Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем

Г.Н. Кулипанов<sup>1</sup>, А.А. Лисенко<sup>2</sup>, Г.Г. Матвиенко<sup>2</sup>, В.К. Ошлаков<sup>2</sup>,  
В.В. Кубарев<sup>1</sup>, Е.Н. Чесноков<sup>3</sup>, С.В. Бабченко<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика М.А. Лаврентьева, 11

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>3</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 8.08.2014 г.

Впервые проведены экспериментальные исследования взаимодействия мощного терагерцового излучения на установке «новосибирский лазер на свободных электронах» на длине волны 130 мкм в окне прозрачности атмосферы с модельным аэрозольным облаком, имеющим известную функцию распределения капель по размерам. Сопоставляются экспериментальные результаты с теоретическими расчетами, полученными при решении лидарного уравнения для условий эксперимента.

*Ключевые слова:* ТГц-излучение, лазер на свободных электронах, дистанционное зондирование; THz radiation, free-electron laser, remote sensing.

### Введение

В настоящее время, благодаря существенному прогрессу в области генерации и приема терагерцового излучения (частоты 0,3–10 ТГц соответствуют  $\lambda = 1 \text{ мм} \div 30 \text{ мкм}$ ), интенсивно развиваются различные системы дистанционного мониторинга атмосферы. Разработаны миллиметровые и субмиллиметровые радиометры нового поколения для спутниковых систем мониторинга фазового состава стратосферных кристаллических облаков и связанных с ним радиационных процессов, которые способны вести наблюдения на частотах вплоть до 3 ТГц [1, 2]. Такой охват по частоте позволяет обеспечить высокую чувствительность для широкого диапазона размеров облачных частиц, поскольку длина волны излучения ТГц-диапазона становится соизмеримой с диаметрами крупных облачных частиц [3, 4].

Развитие дистанционного зондирования нижней атмосферы — области, которая недоступна для спутниковых измерений, с целью изучения особенностей

пространственно-временной изменчивости влагосодержания атмосферы, фазового состава облаков нижнего яруса, туманов и осадков и других задач, также требует расширения частотного диапазона средств активного дистанционного зондирования. Следует отметить, что источников терагерцового диапазона, пригодных для активного дистанционного зондирования, до сих пор практически не существует, поэтому очевиден интерес, который проявляют специалисты в области лидарного зондирования окружающей среды к новосибирскому лазеру на свободных электронах (ЛСЭ). Во-первых, импульсная и средняя спектральная мощность излучения этого лазера является рекордной в мире, и, по-видимому, останется такой в ближайшее время ( $P_{\text{имп}} \sim 0,7 \text{ МВт}$ ,  $P_{\text{ср}} \sim 0,5 \text{ кВт}$ ) [5]. Ни один из доступных на настоящий момент источников ТГц-излучения не обладает достаточной мощностью для реализации указанных приложений в нижней атмосфере. Во-вторых, широкий диапазон плавной перестройки ЛСЭ по длине волны позволяет реализовать идеологию многочастотного зондирования микрофизических параметров аэрозольных частиц — существует возможность выбора длин волн зондирования в окнах прозрачности атмосферы во всем диапазоне работы ЛСЭ от 7 до 235 мкм, информативных для широкого класса задач дистанционного зондирования атмосферы. При этом если диапазон 7–30 мкм, соответствующий создаваемой в настоящее время 3-й очереди ЛСЭ,

\* Геннадий Николаевич Кулипанов (G.N.Kulipanov@inp.nsk.su); Андрей Александрович Лисенко (Lisenko@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Виталий Владимирович Кубарев; Евгений Николаевич Чесноков (chesnok@kinetics.nsc.ru); Светлана Владимировна Бабченко (bsvetlana@sibmail.com).

достаточно хорошо изучен, то для диапазона 30–235 мкм, соответствующего уже запущенным в работу 1-й и 2-й очередям ЛСЭ, существует ряд вопросов, связанных с отсутствием экспериментальных исследований как пропускания атмосферы, так и взаимодействия излучения ТГц-диапазона с водным аэрозолем.

В целом, взаимодействие терагерцового излучения с водным капельным аэрозолем достаточно полно теоретически исследовано, однако до сих пор не получило практического подтверждения. Восполнение этого пробела является задачей наших экспериментальных исследований.

## Техника эксперимента

С целью постановки эксперимента по взаимодействию терагерцового излучения с водным капельным аэрозолем был создан стенд, включающий в себя следующие элементы: источник излучения (ЛСЭ) 1, оптомеханический модулятор 2, телескоп системы Ньютона 3, аэрозольное облако 4, приемник излучения 5, электронный модуль для цифрового сбора и обработки данных 6, компьютер 7 (рис. 1).

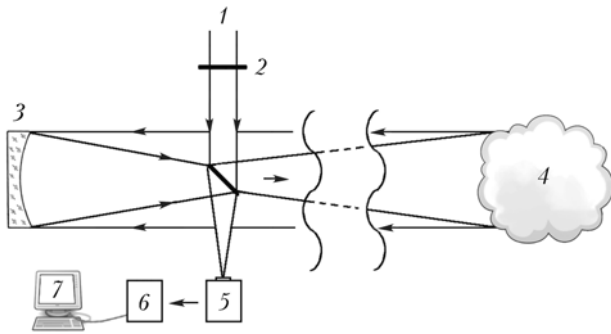


Рис. 1. Блок-схема эксперимента

Излучение ЛСЭ на длине волны 130 мкм имело следующие параметры: степень линейной поляризации излучения  $> 99,6\%$ , качество пучка – дифракционное, угол расходимости  $\theta = 4$  мрад, FWHM-диаметр пучка на телескопе  $d_0 = 3$  см, частота повторения импульсов  $f = 5,6$  МГц, средняя мощность  $P_{cp} = 100$  Вт, длительность импульса  $\tau = 100$  пс,  $P_{имп} = 0,2$  МВт. Спектр излучения в окне прозрачности атмосферы, снятый на спектрометре Bruker IFS 66 v/S, приведен на рис. 2.

Пропускание атмосферного окна  $T$  рассчитывалось по данным спектроскопического каталога «JPL Submillimeter Catalog», в котором содержится информация о 916 линиях молекул воды в основном колебательном состоянии и о 55983 линиях поглощения колебательно-возбужденных молекул воды для дистанции 10 м при удельном содержании водяного пара  $w = 0,12$  см/км.

Для детектирования сигнала обратного рассеяния был использован оптоакустический приемник GC-1P (ячейка Голея) производства фирмы Tydex [6],

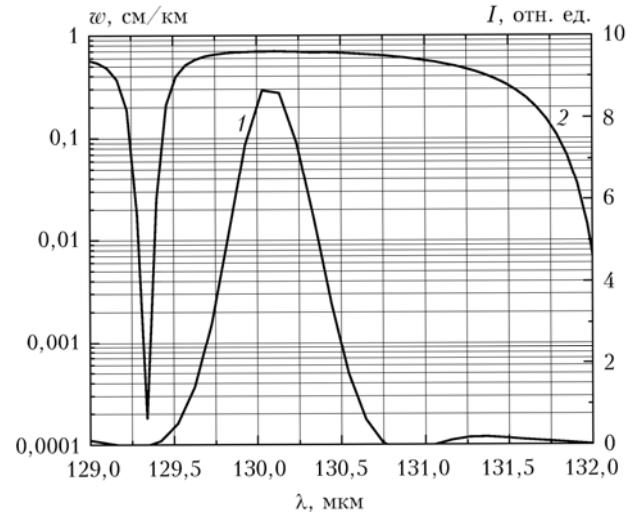


Рис. 2. Спектр излучения новосибирского ЛСЭ на длине волны 130 мкм (1) в окне прозрачности атмосферы, рассчитанном для дистанции 10 м при удельном содержании водяного пара  $w = 0,12$  см/км (2)

относящийся к классу малоселективных неохлаждаемых приемников, способных регистрировать низкоэнергетические сигналы до  $10^{-5}$  Дж в диапазоне длин волн от 0,3 мкм до 6–8 мм. Основной особенностью применения данного приемника является необходимость использования модулятора, прерывающего измеряемый поток излучения. Выбор рабочей частоты ( $f_r = 17$  Гц) был обусловлен особенностью работы оптоакустического приемника и связан прежде всего с тем, что оптимальным диапазоном частот, где приемник имеет наибольшую чувствительность, является интервал 10–25 Гц. Оптоакустический приемник GC-1P на частоте модуляции 17 Гц при диаметре входного окна  $d = 5$  мм имеет следующие основные энергетические характеристики: вольваттная чувствительность  $W = 8,7 \cdot 10^4$  В/Вт, эквивалентная мощность шума  $NEP = 1,1 \cdot 10^{-10}$  Вт/Гц $^{1/2}$ , постоянная времени  $t = 36$  мс, обнаружительная способность  $D^* = 3,9 \cdot 10^9$  Гц $^{1/2}$ /(Вт·см). Обнаружительная способность приемника характеризует отношение сигнал-шум (S/N) при падении излучения мощностью 1 Вт на его приемную апертуру и вычисляется по формуле

$$D^* = \frac{S/N\sqrt{\Delta f}}{P\sqrt{A}}, \quad (1)$$

где  $S$  – сигнал на выходе приемника;  $N$  – собственный шум приемника;  $P$  – мощность, падающая на вход приемника;  $A$  – площадь приемной апертуры, см $^2$ ;  $\Delta f$  – ширина полосы шума, Гц. Эквивалентная мощность шума NEP определяется как  $NEP = \sqrt{A}/D^*$ , Вт/Гц $^{1/2}$ .

Суть проведенного эксперимента состояла в регистрации модулированного оптомеханическим модулятором излучения, рассеянного аэрозольным облаком, расположенным на короткой (до 10 м) трассе. Рассеянное излучение собиралось телескопом

Ньютона с зеркалом площадью  $S_r = 0,07 \text{ м}^2$  и фокусировалось на вход оптоакустического приемника. Сигнал с измерительного преобразователя передавался в электронный модуль для цифрового сбора и обработки данных.

На рис. 3 приведен пример зарегистрированного сигнала обратного рассеяния от аэрозольного облака на расстоянии 3 м. График представляет собой FFT-спектр (преобразование Фурье) входного сигнала.

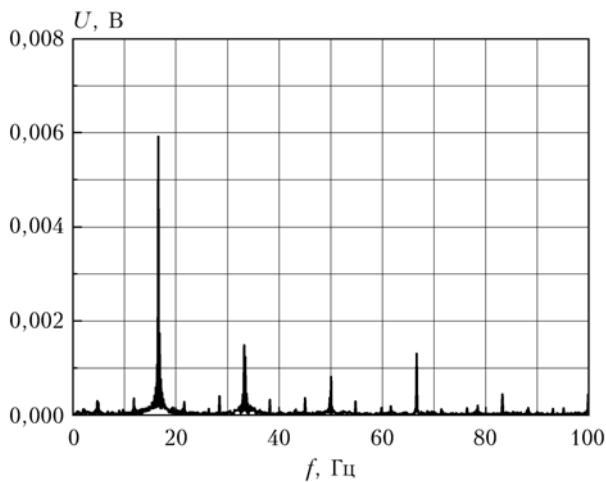


Рис. 3. Сигнал обратного рассеяния, зарегистрированный оптоакустическим приемником GC-1P на частоте модуляции 17 Гц от облака водного аэрозоля. Соседние пики — внешний тепловой фон, модулированный кратными частотам работы электрической сети 50 Гц и на других частотах, связанных с механическими колебаниями, попадающими в диапазон чувствительности приемника

На горизонтальной оси отложена частота. На вертикальной оси отложены значения спектральной плотности входного сигнала, измеренного в RMS (корень среднего квадрата), связанного с квадратным корнем ширины частотной полосы. На частоте 17 Гц расположен пик сигнала обратного рассеяния с амплитудой 0,0058 В. Зная оптическую чувствительность приемника, можно вычислить величину  $P$  и из соотношения (1) определить значение  $S/N$ . Для данного случая  $S/N = 8$ . При регистрации также обнаружено наличие шумовых сигналов, представляющих собой тепловой фон, на частотах, кратных 50 Гц, происхождение которых объясняется работой оборудования в сети с напряжением частотой 50 Гц и на других частотах, связанных с механическими колебаниями, попадающими в диапазон чувствительности приемника.

## Математическое моделирование

Для моделирования эксперимента произведем оценки отношения  $S/N$ , закладывая в расчет параметры излучения ЛСЭ, оптическую схему детектирования, характеристики оптоакустического приемника GC-1P, оптические характеристики модельного аэрозольного облака и атмосферы. Величину  $S/N$  можно оценить из выражения [7, 8]:

$$S/N = \frac{P_s}{\sqrt{2\Delta f(P_s + P_b) \frac{2hc}{\lambda\eta} + NEP^2 \Delta f}}, \quad (2)$$

где  $\eta$  — квантовая эффективность детектора;  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света.

Мощность лидарного эхосигнала от аэрозольного облака определяется выражением

$$P_s = P_{\text{имп}} \frac{c\tau}{2} K(r) G(r) \beta_\pi(r) \left(\frac{S_r}{r^2}\right) T_a^2. \quad (3)$$

Здесь  $P_{\text{имп}}$  — пиковая мощность ЛСЭ;  $K(r)$  — аппаратная константа;  $\tau$  — длительность импульса;  $S_r$  — площадь приемной антенны;  $G(r)$  — геометрический фактор;  $\beta_\pi(r)$  — объемный коэффициент обратного рассеяния в единицу телесного угла;  $T_a$  — пропускание атмосферы и аэрозольного облака. На данной длине волны  $T_a$  определяется законом Бугера—Ламберта—Бера

$$T_a = \exp\left(-\int_0^R [\gamma_m(\lambda, r) + \gamma_a(\lambda, r)] dr\right), \quad (4)$$

где  $r$  — расстояние;  $\gamma_m$  и  $\gamma_a$  — показатели ослабления излучения атмосферой и аэрозольным облаком.

В численный эксперимент помимо параметров излучения ЛСЭ и приемника закладываем вариацией показателя молекулярного поглощения атмосферными парами воды. Молекулярное рассеяние, поскольку оно происходит по закону  $\lambda^{-4}$ , не играет существенной роли в ТГц-диапазоне, и его можно не учитывать. Показатели поглощения  $\alpha$  в полосе пропускания атмосферы с центром на длине волны 130 мкм для различного удельного содержания водяного пара  $w$  представлены на рис. 4.

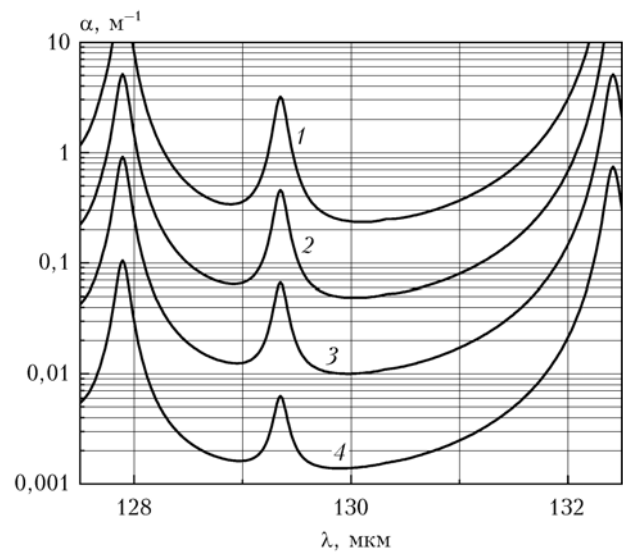


Рис. 4. Поглощение в окне прозрачности атмосферы с центром на 130 мкм в зависимости от удельного содержания водяного пара: кривые 1 —  $w_1 = 0,6$ ; 2 —  $w_2 = 0,12$ ; 3 —  $w_3 = 0,02$ ; 4 —  $w_4 = 0,03 \text{ см/км}$

Рассеяние на облаке водного аэрозоля объясняется с помощью теории Ми, которая справедлива как для рассеяния на больших частицах, размер которых сопоставим или значительно больше длины волны, так и для рассеяния на малых частицах, размер которых значительно меньше длины волны. Для расчетов оптических коэффициентов взаимодействия излучения ЛСЭ на  $\lambda = 130$  мкм с аэрозольным облаком была выбрана модель облака, описываемого логнормальным распределением капель по размерам с модальным радиусом 2 мкм. Расчеты по Ми дали следующие значения оптических коэффициентов взаимодействия, которые были использованы в вычислениях: показатель ослабления  $\gamma_a = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ , коэффициент обратного рассеяния  $\beta_\pi = 1,03 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ .

На рис. 5 представлены расчеты S/N (сплошные линии) для различного содержания водяных паров на трассе зондирования, кружками показаны экспериментальные измерения S/N, полученные при измерениях на различных расстояниях до аэрозольного облака. Измерения хорошо ложатся на кри-

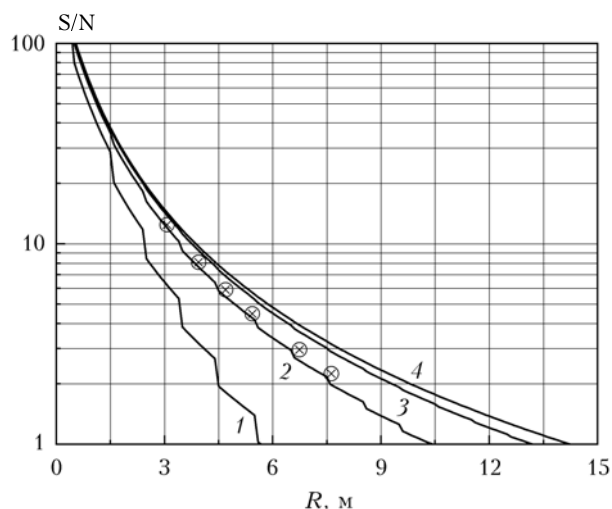


Рис. 5. Сравнение полученных в эксперименте и рассчитанных величин S/N на длине волны 130 мкм: кривые 1 –  $w_1 = 0,6$ ; 2 –  $w_2 = 0,12$ ; 3 –  $w_3 = 0,02$ ; 4 –  $w_4 = 0,003 \text{ см/км}$

вую, соответствующую содержанию водяного пара 0,12 см/км, что близко к реальным условиям проведения эксперимента.

## Заключение

Результаты экспериментальных измерений и численного моделирования регистрации сигнала обратного рассеяния от аэрозольного облака с модальным радиусом капель 2 мкм на длине волны 130 мкм показали хорошее качественное совпадение. Это говорит о том, что можно ожидать увеличения сигнала обратного рассеяния на порядки при наличии в аэрозольном облаке капель, соизмеримых с длиной волны. Такие эксперименты планируется провести на новосибирском ЛСЭ в ближайшее время.

1. Siegel P.H. THz Instruments for Space // IEEE. Trans. Antennas Propag. 2007. V. 55, N 11. P. 2957–2965.
2. Racette P., Adler R.F., Wang J.R., Gasiewski A.J., Jackson D.M., Zacharias D.S. An airborne millimeter-wave imaging radiometer for cloud, precipitation, and atmospheric water vapor studies // J. Appl. Ocean. Technol. 1996. V. 13, N 3. P. 610–619.
3. Wu D.L., Pickett H.M., Livesey N.J. Aura MLS THz observations of global cirrus near the tropopause // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L15803. DOI: 10.1029/2008GL034233.
4. Mendrok J., Baron P., Kasai Y. Studying the potential of terahertz radiation for deriving ice cloud microphysical information // Proc. SPIE. 2008. V. 7107. DOI: 10.1117/12.800262.
5. Kulipanov G.N., Gavrilov N.G., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Matveenko A.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Ovchar V.K., Popik V.M., Salikova T.V., Scheglov M.A., Serednyakov S.S., Shevchenko O.A., Skrinisky A.N., Tcheskidov V.G., Vinokurov N.A. Research highlights from the Novosibirsk 400 W average power THz FEL // Terahertz Sci. Technol. 2008. V. 1, N 2. P. 107–125.
6. URL: <http://www.tydex.ru>
7. Межерис П. Лидарное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
8. Иващенко М.В., Шерстов И.В. Дальность действия лидара дифференциального поглощения на основе CO<sub>2</sub>-лазера // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 8. С. 747–752.

G.N. Kulipanov, A.A. Lisenko, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, V.V. Kubarev, E.N. Chesnokov, S.V. Babchenko. Experimental study of the interaction between terahertz radiation from the Novosibirsk free-electron laser and water aerosol.

The interaction of high-power terahertz radiation from the Novosibirsk free-electron laser at a wavelength of 130  $\mu\text{m}$  in atmospheric transparency window with a model aerosol cloud having the known droplet size distribution function has been studied experimentally for the first time. The experimental data are compared with theoretical calculations obtained from solution of the lidar equation for conditions of the experiment.