

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА
НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ВОДНЫМ АЭРОЗОЛЕМ**

Г.Н. Кулипанов¹, А.А. Лисенко², Г.Г. Матвиенко², В.К. Ошлаков², С.В. Бабченко²

¹*Институт ядерной физики СО РАН,
Россия, г. Новосибирск,*

E-mail: G.N.Kulipanov@inp.nsk.su

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
Россия, г. Томск,*

E-mail: Lisenko@iao.ru

Впервые проведены экспериментальные исследования взаимодействия мощного терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах на длине волны 117 мкм в окне прозрачности атмосферы с модельным аэрозольным облаком, имеющим известную функцию распределения капель по размерам. Приведено сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими расчетами, полученными при решении лидарного уравнения для условий эксперимента.

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERACTION BETWEEN TERAHERTZ RADIATION
FROM THE NOVOSIBIRSK FREE-ELECTRON LASER AND WATER AEROSOL**

G.N. Kulipanov¹, A.A. Lisenko², G.G. Matvienko², V.K. Oshlakov², S.V. Babchenko²

The interaction of high-power terahertz radiation from the Novosibirsk free-electron laser at a wavelength of 117 μm 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.

В настоящее время, благодаря существенному прогрессу в области генерации и приема терагерцового излучения (0.3–10 ТГц соответствует $\lambda=1$ мм–30 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 широкий 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 ЛСЭ. Во первых, импульсная и средняя спектральная мощность излучения этого лазера является рекордной в мире, и, по-видимому, останется такой в ближайшее время ($P_{им} \sim 1$ МВт, $P_{ср} \sim 0.5$ 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 3-й очереди ЛСЭ, достаточно хорошо изучен, то в диапазоне 30–235 мкм 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 укладываются в теорию Ми и на настоящий момент достаточно полно теоретически исследовано, однако до сих пор не получило экспериментальных подтверждений. Восполнение этого пробела является целью 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), опто-механический модулятор, телескоп системы Ньютона, приемник излучения, электронный модуль для цифрового сбора и обработки данных. Блок схема эксперимента показана на рис. 1.

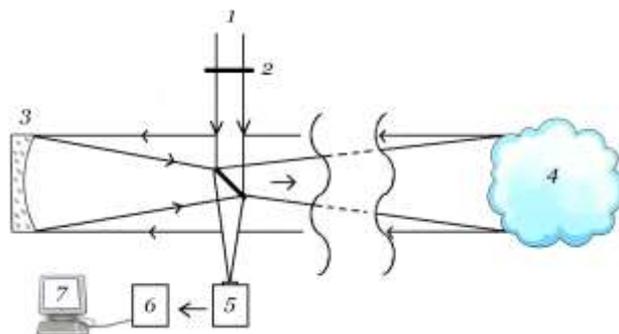


Рис. 1. Блок схема эксперимента. 1 – излучение ЛСЭ, 2 – опто-механический модулятор, 3 – телескоп системы Ньютона, 4 – аэрозольное облако, 5 – приемник излучения, 6 – электронный модуль для цифрового сбора данных, 7 – компьютер.

Излучение ЛСЭ на длине волны 117 мкм имело следующие параметры: степень линейной поляризации излучения >99.6 %, расходимость излучения – дифракционная, диаметр пучка в точке $r_0=1.62$ см, частота повторения импульсов $f=10$ МГц, средняя мощность $P_{cp}=100$ Вт, длительность импульса $\tau=100$ пс, $P_{им}=0.1$ МВт.

Для детектирования сигнала обратного рассеяния был использован опто-акустический приемник GC-1P (ячейка Голея) производства фирмы Tydex [6] относящийся к классу неселективных 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 ($f=17$ Гц) был обусловлен особенностью работы опто-акустического приемника и связан прежде всего с тем, что оптимальным диапазоном частот, где приемник имеет наибольшую чувствительность является интервал 10–25 Гц. Опто-акустический приемник GC-1P на частоте модуляции 17 Гц при диаметре входного окна $d=5$ мм имеет следующие основные энергетические характеристики: оптическая чувствительность $W=8.7 \times 10^4$ В/Вт, эквивалентная мощность шума $NEP=1.1 \times 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}, скорость отклика $t=36$ мс, обнаружительная способность $D^*=3.9 \times 10^9$ смГц^{1/2}/Вт. Обнаружительная способность приемника характеризует отношение сигнал/шум (S/N) при падении энергии 1Вт на его приемную апертуру и вычисляется по формуле:

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

где: S – сигнал на выходе приемника, N – собственный шум приемника, P_s – мощность, падающая на вход приемника [Вт/см²], A – апертура приемника [см²], Δf – 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 опто-механическим модулятором излучения, рассеянного аэрозольным облаком, расположенным на короткой, до 10 м, трассе. Рассеянное излучение собиралось телескопом Ньютона с зеркалом площадью $S=0.07$ м² и фокусировалось на вход опто-акустический приемника. Сигнал с измерительного преобразователя передавался в электронный модуль для цифрового сбора и обработки данных.

На рис. 2 приведен пример зарегистрированного сигнала обратного рассеяния от аэрозольного облака на расстоянии 3 м. График представляет собой FFT спектр (преобразование Фурье)

входного сигнала. На горизонтальной оси отложена частота. На вертикальной оси отложены значения спектральной плотности входного сигнала, измеренного в RMS (корень среднего квадрата) Вольт, связанного с квадратным корнем ширины частотной полосы, Гц. На частоте 17 Гц расположен пик сигнала обратного рассеяния с амплитудой 0.0058 В. Зная оптическую чувствительность приемника можно вычислить величину P_s 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.

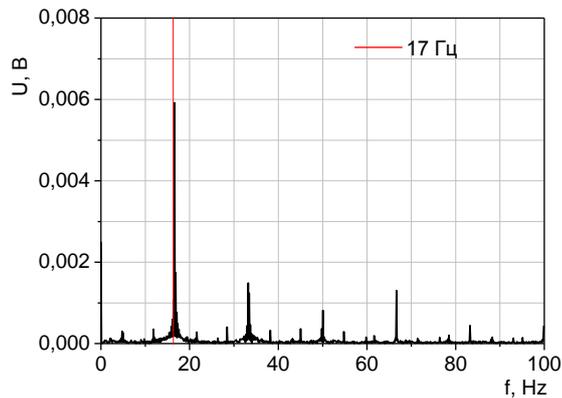


Рис. 2 Сигнал обратного рассеяния зарегистрированный опто-акустическим приемником GC-1P на частоте модуляции 17 Гц от облака водяного аэрозоля. Соседние пики – внешний тепловой фон, модулированный кратными частотам работы электрической сети 50 Гц.

Математическое моделирование

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

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

Мощность лидарного эхо-сигнала от аэрозольного облака P_s определяется выражением:

$$P_s = P_0 \frac{c\tau}{2} K(r)G(r)\beta_\pi(r) \left(\frac{S_r}{r^2} \right) T_a^2, \quad (3)$$

где P_0 – пиковая мощность ЛСЭ, $K(r)$ – аппаратная константа, c – скорость света, τ – 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, γ_m и γ_a – показатели ослабления излучения атмосферой и аэрозольным облаком.

В численный эксперимент помимо параметров излучения ЛСЭ и приемника закладываем вариацию показателя молекулярного поглощения атмосферными парами воды. Молекулярное рассеяние, поскольку оно происходит по закону λ^{-4} , не играет существенной роли в ТГц диапазоне и его можно не учитывать. Удельное содержание водяного пара w задаем в широком диапазоне значений 0.6, 1.2, 0.02, 0.03 см/км. Показатели поглощения γ_m на длине волны 117 мкм при этом имеют следующие значения 1.4e-2, 3e-2, 6.5e-3, 9.3e-4 м⁻¹.

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 $\lambda=117$ 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 расчетах: показатель ослабления $\gamma_a=1.31e-6$ м⁻¹, коэффициент обратного рассеяния $\gamma_{pl}=1.03e-8$ м⁻¹.

На рис. 3 представлены расчеты S/N (сплошные черные линии) для различного содержания водяных паров на трассе зондирования, красными кружками показаны экспериментальные измерения S/N полученные при измерениях на различных расстояний до аэрозольного облака. Измерения хорошо ложатся на кривую соответствующую содержанию водяного пара 1.2 см/км, что близко к реальным условиям проведения эксперимента.

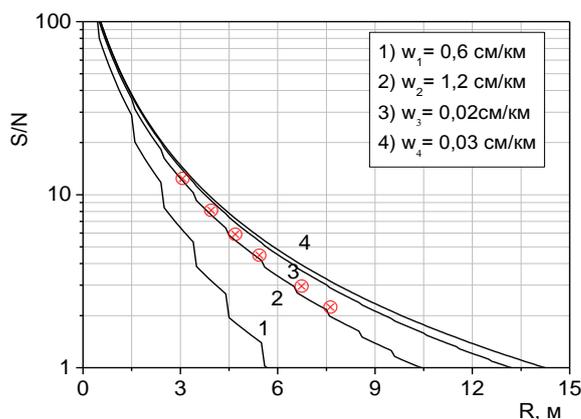


Рис. 3. Сравнение полученных в эксперименте и рассчитанных величин S/N на длине волны 117 мкм.

Заключение

Результаты натурного эксперимента и численного моделирования регистрации сигнала обратного рассеяния от аэрозольного облака с модальным радиусом капель 2 мкм на длине волны 117 мкм показали хорошее качественное совпадение. Это говорит о том, что мы в праве ожидать увеличения сигнала обратного рассеяния на порядки при наличии в аэрозольном облаке капель соизмеримых с длиной волны, однако это требует продолжения экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Siegel P.H. THz Instruments for Space // IEEE. Transactions on Antennas and Propagation. 2007. V. 55, N. 11. P. 2957–2965.
2. Racette P., Adler R.F., Wang J.R., et al. An airborne millimeter-wave imaging radiometer for cloud, precipitation, and atmospheric water vapor studies // J. [1] Appl. Oceanic Technol. 1996. V. 13. P. 610–619.
3. Wu D.L., Pickett H.M., Livesey N.J. Aura MLS THz observations of global cirrus near the tropopause // Geophysical Research Letters. 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 // Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIII // Proc. of SPIE V. 7107, 710704. doi:10.1117/12.800262.
5. Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // Measurement Science and Technology. 2010. V.21. 054017. P. 13.
6. <http://www.tydex.ru>.
7. Межерис Р. Лидарное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.
8. Иващенко М.В., Шерстов И.В. Дальность действия лидара дифференциального поглощения на основе CO₂-лазера // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, № 8. С. 747–752.