

УДК 551.57+535.14

## Перспективы применения терагерцового лазера на свободных электронах в задачах дистанционного зондирования атмосферы

Е.Г. Каблукова<sup>1</sup>, А.А. Лисенко<sup>2,3</sup>, Г.Г. Матвиенко<sup>2,3</sup>,  
С.В. Бабченко<sup>2</sup>, Е.Н. Чесноков<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

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

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>4</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 18.07.2013 г.

Рассматривается возможность использования установки «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) в качестве источника терагерцового излучения для дистанционного зондирования приземной атмосферы. Для диапазона 40–250 см<sup>-1</sup> решена задача выбора спектральных участков зондирования. Выполнен численный эксперимент по моделированию сигнала терагерцового лидара на базе Новосибирского ЛСЭ, отраженного нижней кромкой облаков для конкретных начальных и граничных оптико-геометрических условий и степени ослабления сигнала на трассе зондирования. Получены оценки дальности зондирования нижней границы облачности в выбранных окнах прозрачности атмосферы в зависимости от удельного содержания осаждаемой воды на трассе зондирования.

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

### Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к возможностям использования когерентного излучения терагерцового (ТГц) диапазона в различных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Под терагерцовым диапазоном подразумевают область частот  $\omega/2\pi$  от 0,3 до 10 ТГц (длины волн от 1 мм до 30 мкм). Этот частотный интервал охватывает часть электромагнитного спектра между инфракрасным (ИК) и микроволновым диапазонами, поэтому его часто называют дальним ИК или субмиллиметровым диапазоном длин волн. В терагерцовом диапазоне находятся большое число сильных линий вращательных переходов молекул, а также линии колебательных и колебательно-вращательных переходов больших молекул, в том числе органических, что открывает возможности их исследования и селективного воздействия на них. Это делает терагерцовые волны перспективным инструментом диагностики и спектроскопии различных сред

[1, 2]. Благодаря существенному прогрессу в области генерации и приема терагерцового излучения данное направление исследований интенсивно развивается в современной прикладной физике.

Из анализа публикаций последних лет можно сделать вывод, что наиболее активное продвижение в данный диапазон наблюдается со стороны спутниковой микроволновой радиометрии. Так, например, к настоящему времени 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 [3, 4]. Такая частота позволяет обеспечить высокую чувствительность радиометров для широкого диапазона размеров облачных частиц, поскольку длина волны излучения ТГц-диапазона становится соизмеримой с диаметрами крупных облачных частиц [5, 6].

Развитие дистанционного зондирования нижней атмосферы, т.е. области, которая недоступна для спутниковых измерений, с целью изучения особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик влагосодержания атмосферы, фазового состава облаков нижнего яруса, туманов и осад-

\* Евгения Геннадьевна Каблукова; Андрей Александрович Лисенко (Lisenko@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Светлана Владимировна Бабченко (bsvetlana@sibmail.com); Евгений Николаевич Чесноков.

ков и др. требует расширения частотного диапазона средств пассивного и активного дистанционного зондирования атмосферы. Освоение ТГц-диапазона позволило бы дополнить измерения фазового состава облаков и осадков (гидрометеоров) в области размеров частиц от 30 мкм до 1 мм, недоступного для методов дистанционного зондирования оптического, ближнего ИК- и миллиметрового диапазонов.

Интерес к новосибирскому лазеру на свободных электронах (НЭСЭ) обусловлен рядом обстоятельств. Во-первых, импульсная и средняя спектральная мощность излучения этого лазера является рекордной в мире и, по-видимому, останется такой в ближайшее время [7]. Ни один из доступных на настоящий момент источников ТГц-излучения не обладает достаточной мощностью для реализации указанных приложений в нижней тропосфере. Пока, в целом, доступные полупроводниковые источники когерентного ТГц-излучения являются маломощными (от нано- до микроватт, иногда до ватт), плохо перестраиваемыми и фактически покрывающими лишь отдельные узкие полосы частот [8–14]. Во-вторых, широкий диапазон плавной перестройки ЛЭСЭ 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 ЛЭСЭ от 7 до 235 мкм, информативных для широкого класса задач дистанционного зондирования атмосферы. При этом если диапазон 7–30 мкм, соответствующий 3-й очереди ЛЭСЭ, достаточно хорошо изучен, то для диапазона 30–235 мкм появляется ряд вопросов, обусловленных прежде всего недостаточной изученностью пропускания атмосферы и связанной с этим дальностью действия потенциального ТГц-лидара.

Ниже приведены характеристики ТГц-излучения для 1, 2, 3-й очередей ЛЭСЭ.

Длина волны основной гармоники ЛЭСЭ 1-й очереди	110 ... 235 мкм
Длина волны основной гармоники ЛЭСЭ 2-й очереди	30 ... 100 мкм
Длина волны основной гармоники ЛЭСЭ 3-й очереди	7 ... 30 мкм
Длительность импульса	40–150 пс
Относительная спектральная ширина	0,2–1 %
Максимальная импульсная мощность	до 1 МВт
Частота повторения импульсов	5,6–22,5 МГц
Максимальная средняя мощность	до 0,5 кВт
Степень линейной поляризации излучения	> 99,6 %
Расходимость излучения	дифракционная

В настоящей статье рассмотрим частный аспект проблемы, касающийся дальности зондирования нижней границы облаков лидаром на базе новосибирского ЛЭСЭ в диапазоне 30–235 мкм.

## 1. Окна прозрачности атмосферы в ТГц-диапазоне

Помимо чисто технических трудностей в области генерации и приема ТГц-излучения, практически все исследования сдерживаются фактором распространения излучения в атмосфере. Незамутненная

и особенно замутненная атмосфера оказывает сильное влияние на ослабление ТГц-излучения. Ослабление в безоблачной атмосфере обусловлено поглощением электромагнитной энергии газами, молекулы которых обладают электрическими или магнитными дипольными моментами. Основным фактором ослабления излучения в ТГц-диапазоне является молекулярное поглощение в водяном паре. Это поглощение вызвано, главным образом, вращательными квантовыми переходами молекул  $H_2O$  из одного энергетического состояния в другое. Вращательный спектр  $H_2O$  сильно развит: вращательных линий достаточно много и они тесно расположены в ТГц-диапазоне [15–17].

Тем не менее несмотря на сильное поглощение ТГц-излучения в водяном паре, благодаря дискретности спектра поглощения существуют окна прозрачности, которые могут быть достаточно узкими и в которых поглощение не столь сильно себя проявляет. Для нахождения окон прозрачности атмосферы в ТГц-диапазоне можно воспользоваться готовыми моделями поглощения излучения в атмосфере, содержащими информацию как о параметрах резонансных линий, так и о непрерывном поглощении. Для волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов наиболее известна и часто используется в практических приложениях эмпирическая модель распространения миллиметровых волн в атмосфере MPM [18]. Также можно воспользоваться базами данных по молекулярной спектроскопии, такими как HITRAN, GEISA, JPL Submillimeter Catalog [19] и др.

Спектры показателя поглощения (рис. 1) рассчитаны с использованием 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. Расчет коэффициентов поглощения производился в частотном интервале  $250\text{--}40\text{ см}^{-1}$  ( $40\text{--}250\text{ мкм}$ ) по формулам, приведенным в работе [20], для температур 298, 273, 253 и 233 К и относительной влажности  $H_r$  50% (абсолютная влажность  $H_a$  при этом составила 11,57; 2,44; 0,443; 0,06 г/м<sup>3</sup> соответственно). Контур спектральной линии описывался функцией Лоренца, ширина всех линий  $\Delta\nu$  считалась одинаковой и составляла  $0,08\text{ см}^{-1}$ .

Абсолютная и относительная влажность не определяет непосредственно количество поглотителя на длине трассы зондирования. Мерой, определяющей суммарное поглощение на трассе, является количество осаждаемой воды, которое можно найти по относительной влажности и длине трассы. Количество осаждаемой воды  $w'$  характеризуется толщиной слоя жидкой воды, образовавшейся при конденсации паров в воздушном столбе единичного сечения, длина которого равна длине трассы. Эта толщина обычно выражается в сантиметрах воды на километре трассы (см/км). Величина слоя осаждаемой воды, приходящейся на 1 км, связана с абсолютной  $H_a$ , выраженной в г/м<sup>3</sup>, и относительной  $H_r$  влажностью, выраженной в долях единицы соотношением  $w' = 0,1H_aH_r$ . Полное количество осаждаемой воды на трассе  $w_T$  выражается в сантиметрах.

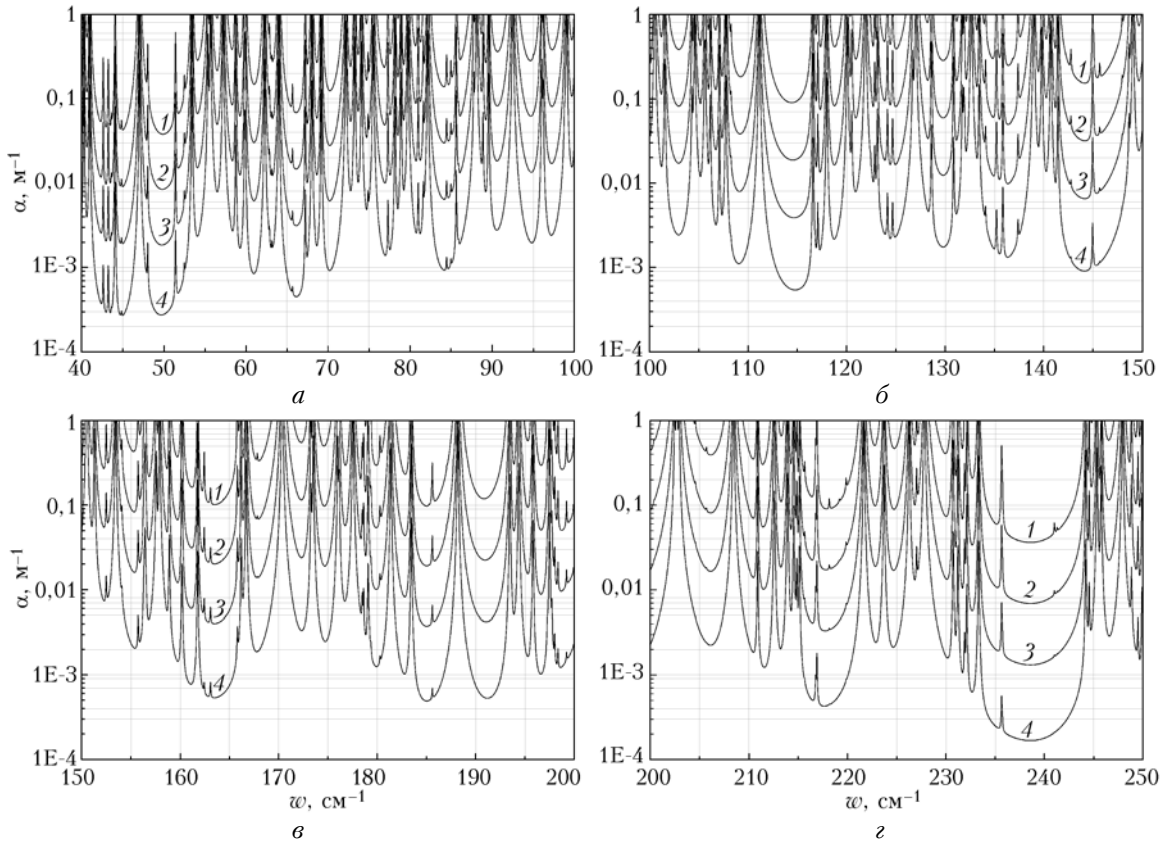


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  ( $\text{M}^{-1}$ ), рассчитанная в частотных диапазонах:  $a - 40'100$ ,  $б - 100'150$ ,  $в - 150'200$ ,  $г - 200'250$   $\text{cm}^{-1}$  для  $H_a$ : 1 – 11,57; 2 – 2,44; 3 – 0,443; 4 – 0,06  $\text{г}/\text{м}^3$

Если абсолютная и относительная влажность на трассе постоянна, то полное количество осажженной воды получается умножением  $w'$  ( $\text{см}/\text{км}$ ) на длину трассы  $R$  ( $\text{км}$ ). На рис. 2 приведены значения коэффициентов ослабления в окнах прозрачности атмосферы с центрами на 45,0 (222), 50,3 (200), 66,4 (151), 70,1 (142), 84,1 (118,7), 115 (87), 240  $\text{см}^{-1}$  (42  $\mu\text{км}$ ) в зависимости от толщины слоя осажженной воды.

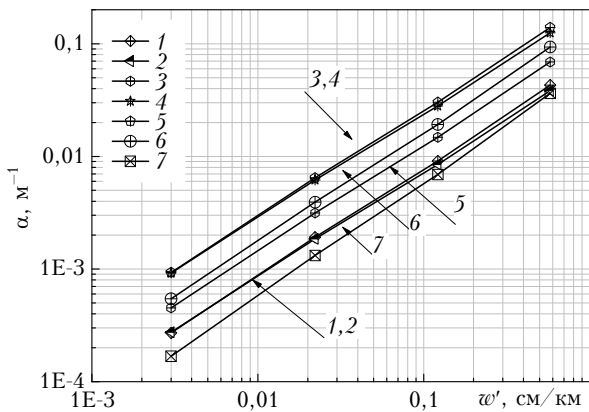


Рис. 2. Показатели поглощения  $\alpha$  в центре окон прозрачности атмосферы в зависимости от количества осажженной воды ( $\text{см}/\text{км}$ ) в атмосфере  $w'$ : 1 – 45,0 (222  $\mu\text{км}$ ); 2 – 50,3 (200  $\mu\text{км}$ ); 3 – 66,4 (150  $\mu\text{км}$ ); 4 – 70,1 (142  $\mu\text{км}$ ); 5 – 84,1 (118  $\mu\text{км}$ ), 6 – 115 (87  $\mu\text{км}$ ), 7 – 240  $\text{см}^{-1}$  (42  $\mu\text{км}$ )

Определенные в результате расчетов показатели поглощения достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными, например, в работе [21], в которой были проведены измерения пропускания атмосферы в диапазоне от 0,3 до 3,9 ТГц при температуре 27 °С и различной относительной влажности воздуха от 6 до 52%.

## 2. Анализ дальности действия ТГц-лидара

Высокий показатель ослабления атмосферы, вызванный поглощением парами воды, ограничивает потенциальные возможности ТГц-лидара. В связи с этим необходимо оценить дальность действия ТГц-лидара в зависимости от влагосодержания атмосферы на трассе зондирования.

Рассмотрим отношение сигнал-шум  $\varepsilon$  [22, 23] для случая детектирования одиночных лидарных эхосигналов. Возможность детектирования сигнала зависит от отношения мощности принимаемого отраженного сигнала от рассеивающего аэрозольного или облачного слоя к мощности шума фотодетектора, при этом максимальный радиус действия лидара будет определяться условием  $\varepsilon = 1$ . Величину  $\varepsilon$  можно оценить из следующего выражения:

$$\varepsilon = \frac{P_s}{\sqrt{2\Delta f(P_s + P_b) \frac{2hc}{\lambda\eta} + \text{NEP}^2 \Delta f}}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – квантовая эффективность детектора; NEP (Noise Equivalent Power) – эквивалентная мощность шума, не зависящая от сигнала и фона, которая определяется как  $NEP = \sqrt{A/D^*}$ , Вт/Гц<sup>1/2</sup> ( $A$  – площадь апертуры приемника,  $D^*$  – обнаружительная способность);  $\Delta f$  – частотная полоса пропускания приемника;  $P_s$  – мощность лидарного эхосигнала, отраженного назад облаком или аэрозольным слоем. Если поле зрения приемной системы лидара соответствует поперечному сечению зондирующего луча на объекте наблюдения или перекрывает это сечение, то  $P_s$  определяется выражением

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

Здесь  $P_0$  – пиковая мощность излучателя;  $K$  – аппаратная константа, имеющая смысл оптической эффективности передающего и приемного трактов;  $c$  – скорость света;  $\tau$  – длительность импульса;  $S_r$  – площадь приемной антенны;  $G(r)$  – геометрический фактор лидарного сигнала;  $\beta_\pi(r)$  – объемный коэффициент обратного рассеяния;  $T_a$  – пропускание атмосферы.

Пропускание  $T_a$  на данной длине волны  $\lambda$  при определенном состоянии атмосферы определяется законом Бугера–Ламберта–Бера:

$$T_a = \exp\left(-\int_0^R [\gamma_m(\lambda, r) + \gamma_a(\lambda, r)] dr\right), \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние;  $\gamma_m$  и  $\gamma_a$  – коэффициенты ослабления излучения из-за поглощения молекулярными газами и атмосферным аэрозолем, м<sup>-1</sup>. Молекулярное (рэлеевское) рассеяние, поскольку оно происходит по закону  $\lambda^{-4}$ , не играет существенной роли в ТГц-диапазоне, и его можно не учитывать. Рассеяние на аэрозолях (туманах, дымке, облаках) объясняется с помощью теории МИ, которая справедлива для рассеяния как на больших частицах, размер которых сопоставим или значительно больше длины волны, так и на малых, размер которых значительно меньше длины волны.

Для расчетов оптических коэффициентов взаимодействия в ТГц-диапазоне была выбрана модель облака [24], которая получена по обобщенным дан-

ным наблюдений микроструктуры облаков умеренных широт в СССР [25], так называемая «стандартная» кривая Medi. Характерной особенностью этой модели распределения является возможность учета крупных фракций капель 20–85 и 85–1500 мкм, которые описываются степенным законом. Диапазон размеров капель 1–20 мкм в данной модели описывается гамма-распределением. В табл. 1 приведены значения коэффициентов ослабления, рассеяния и радиолокационного отражения для длин волн в центрах выбранных окон прозрачности атмосферы, использованных в расчетах.

Атмосфера создает собственное тепловое излучение, на фоне которого приходится наблюдать сигнал обратного рассеяния. Основной вклад в излучение безоблачной атмосферы в ТГц-диапазоне вносит водяной пар, причем из-за большого значения оптической толщи излучение формируется в нижних слоях воздуха. Мощность фонового излучения атмосферы, падающего на площадку детектора  $A$ , описывается выражением

$$P_b = B_a(\lambda)A\Omega\Delta\lambda,$$

где  $B_a(\lambda)$  – спектральная интенсивность фонового излучения;  $\Omega$  – телесный угол поля зрения приемного тракта;  $\Delta\lambda$  – спектральная ширина полосы пропускания приемного тракта.

Спектральная интенсивность теплового излучения атмосферы в ТГц-диапазоне может быть рассчитана по закону Планка, т.е. представлена как излучение абсолютно черного тела с температурой окружающей среды  $T_s$  [26]:

$$B_a(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT_s) - 1]}$$

( $h$  и  $k$  – постоянные Планка и Больцмана). Рассчитанные значения спектральной интенсивности теплового излучения атмосферы в выбранных окнах прозрачности даны в табл. 2.

На рис. 3 приведены результаты расчета максимального радиуса действия лидара  $R_{\max}(\epsilon = 1)$  для отраженного от облака типа Medi единичного импульса излучения ЛСЭ мощностью 0,5 МВт и длительностью импульса  $\tau = 180$  пс, в зависимости от удельного содержания осажденной воды на трассе распространения сигнала на выбранных длинах волн

Таблица 1

**Коэффициенты ослабления  $\gamma_a$ , рассеяния  $\gamma_s$  и радиолокационного отражения  $\gamma_{\beta\pi}$  для модели распределения капель по размерам «Medi»**

$\lambda$ , мкм	42	87	118,7	142	151	200	222
$\gamma_a$ , дБ/км	221,623	111,623	59,293	47,091	39,58	28,242	25,979
$\gamma_s$ , дБ/км	62,451	23,431	8,143	4,753	2,945	0,941	0,689
$\gamma_{\beta\pi}$ , км <sup>-1</sup>	0,392	0,380	0,167	0,1055	0,068	0,0236	0,0175

Таблица 2

**Интенсивность теплового излучения атмосферы в выбранных окнах прозрачности атмосферы при  $T = 263$  К**

$\lambda$ , мкм	42	87	118,7	142	151	200	222
$B_a$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·мкм·ср)	0,317	0,029	0,0084	0,042	0,0033	0,0011	0,008

Характеристики некоторых типов болометров

Тип болометра (вид термочувствительного элемента)	NEP		$\tau$ , с	T, К
	Вт/Гц <sup>1/2</sup>	Вт		
TEB	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-11}$	0,13	1,5
Ge	$7 \cdot 10^{-13}$	$7 \cdot 10^{-10}$	0,0003	4,2
Ga-Ge	$5 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-12}$	0,025	1,2
In-Sb-Ge	$6 \cdot 10^{-16}$	$6 \cdot 10^{-13}$	0,006	0,35

в окнах прозрачности атмосферы. В расчетах были приняты следующие значения параметров приемопередающего тракта:  $K = 0,7$ ,  $S_r = 0,07 \text{ м}^2$ ,  $\Omega = 1 \text{ мрад}$ ,  $G = 1$ . В качестве детектора приняты характеристики неохлаждаемого оптоакустического детектора Голя с  $\text{NEP} = 8,45 \cdot 10^{-11} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ .

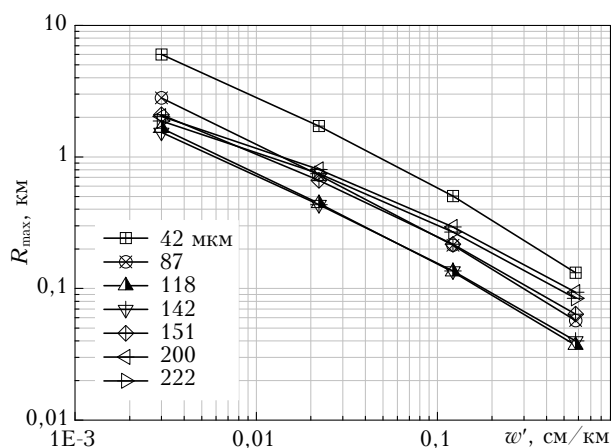


Рис. 3. Расчетные зависимости расстояний  $R_{\text{max}}$ , на которых может быть зарегистрирован сигнал обратного рассеяния от облака типа Med1, в окнах прозрачности атмосферы с центрами на 222, 200, 150, 142, 118, 87, 42 мкм в зависимости от  $w'$  на трассе зондирования

На рис. 4 приведены расчеты  $R_{\text{max}}$  для длины волны 222 мкм при использовании нескольких типов охлаждаемых до температуры жидкого гелия болометров, характеристики которых представлены в табл. 3.

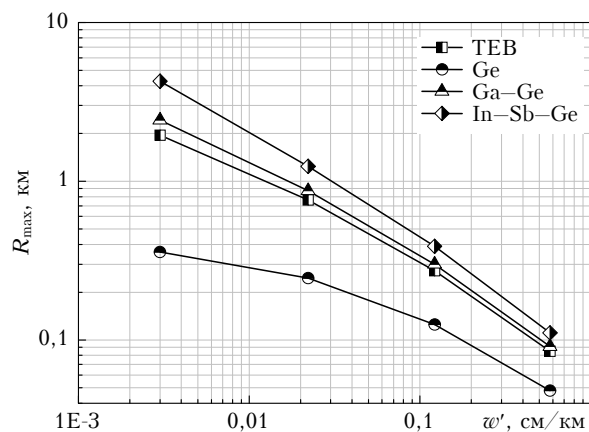


Рис. 4. Расчетные зависимости расстояний  $R_{\text{max}}$ , на которых может быть зарегистрирован сигнал обратного рассеяния от облака типа Med1 в окнах прозрачности атмосферы с центром на  $\lambda = 222 \text{ мкм}$  в зависимости от количества осаждаемой воды на трассе зондирования при использовании охлаждаемых болометров различных типов: 1) TEB, 2) Ge, 3) Ga-Ge, 4) In-Sb-Ge

Из полученных зависимостей следует, что для одиночного импульса ЛСЭ на выбранных длинах волн максимальные дальности зондирования нижней границы облачности могут достигать порядка 2 км при удельном содержании осаждаемой воды  $w' = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см/км}$  на трассе зондирования (см. рис. 3).

С увеличением содержания осаждаемой воды до  $10^{-1} \text{ см/км}$  зона действия ТГц-лидара уменьшается примерно до 200 м. При использовании охлаждаемых болометров дальность действия ТГц-лидара на базе ЛСЭ при  $w' = 10^{-1} \text{ см/км}$  увеличится незначительно. При низком  $w' = 10^{-3} \text{ см/км}$  дальность действия терагерцового лидара на базе ЛСЭ может быть увеличена примерно до 4 км при использовании болометра с термочувствительным элементом типа In-Sb-Ge.

## Заключение

Таким образом, численное моделирование позволило оценить дальность зондирования нижней границы облачности на основе ТГц-лазера на свободных электронах. Полученные оценки  $R_{\text{max}}$  показывают, что использование зондирования нижней границы облаков в ТГц-диапазоне лидаром, созданным на базе ЛСЭ, с наибольшей вероятностью будет возможно только при определенных, условиях, характеризующихся низким удельным содержанием осаждаемой воды на трассе зондирования. В умеренных широтах такие условия складываются в зимний период при температуре ниже  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  и при низкой относительной влажности воздуха. Максимальный радиус действия ТГц-лидара на базе ЛСЭ в зависимости от удельного содержания осаждаемой воды на трассе зондирования от  $10^{-1}$  до  $10^{-3} \text{ см/км}$  может варьироваться от 200 м до 4 км при использовании болометров, охлажденных до температуры жидкого гелия.

В целом в приземной атмосфере возможны исследования только на коротких трассах в узких температурных условиях, поэтому более перспективно при наличии источников ТГц-излучения проводить исследования облачности в верхней атмосфере на высотах свыше 5 км, где влияние поглощения паров воды на трассе зондирования не будет оказывать существенного влияния на распространение ТГц-излучения.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта междисциплинарных фундаментальных исследований в СО РАН № 52.

1. Brown E.R., Woolard D.L., Samuels A.C., Globus T., Gelmont B. Remote Detection of Bioparticles in the THz Region // Proc. IEEE. V. 3. June, 2002. IMS, Seattle, WA. P. 1591–1594.
2. Globus T., Woolard D.L., Samuels A.C., Gelmont B.L., Hesler J.L., Crowe T.W., Bykhovskaia M. Submilli-

- meter-Wave FTIR Spectroscopy of DNA Macromolecules and Related Material // *Appl. Phys.* 2002. V. 91, N 9. P. 6106–6113.
3. Siegel P.H. THz Instruments for Space // *IEEE. Transactions on Antennas and Propagation.* 2007. V. 55, N 11. P. 2957–2965.
  4. 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. Atmos. Ocean.* 1996. V. 13, N 3. P. 610–619.
  5. 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.
  6. 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. SPIE.* 2008. V. 7107. DOI: 10.1117/12.800262.
  7. Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // *Meas. Sci. Technol.* 2010. V. 21. 054017. P. 13.
  8. Андронов А.А., Козлов В.А., Мазов Л.С., Шастин В.Н. Об усилении далекого инфракрасного излучения в германии при инверсии населенностей «горячих» дырок // *Письма в ЖЭТФ.* 1979. Т. 30, вып. 9. С. 585–589; Andronov A.A., Kozlov V.A., Pavlov S.A., Pavlov S.G. Bragg selection in hot hole FIR lasers // *Opt. Quantum. Electron.* 1991. V. 23, N 2. P. S205–S210.
  9. Shastin V.N. Hot hole inter-sub-band transition p-Ge FIR laser // *Opt. Quantum. Electron.* 1991. V. 23, N 2. P. S111–S131.
  10. Gousev Yu.P., Altukhov I.V., Korolev K.A., Sinis Y.P., Kagan M.S., Haller E.E., Odnoblyudov M.A., Yassievich I.N., Chao K.A. Widely tunable continuous wave THz laser // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 75, N 6. P. 757–759.
  11. Brundermann E., Chamberlin D.R., Haller E. High dusty cycle and continuous terahertz emission from germanium // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76, N 21. P. 2991–2993.
  12. Kohler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H.E., Linfield E.H., Davies A.G., Ritchie D.A., Iotti R.C., Rossi F. Terahertz semiconductor-heterostructure laser // *Nature (Gr. Brit.).* 2002. V. 417. P. 156–159. DOI: 10.1038/417156a.
  13. Colombelli R., Capasso F., Gmachl C., Hutchinson A.L., Sivco D.L., Tredicucci A., Wanke M.C., Sergent A.M., Cho A.Y. Far-infrared surface-plasmon quantum-cascade lasers at 21.5  $\mu\text{m}$  and 24  $\mu\text{m}$  wavelengths // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78, N 18. P. 2620–2622.
  14. Faist J., Hofstetter D., Beck M., Aellen T., Rochat M., Blaser S. Bound-to-continuum and two-photon resonance, quantum-cascade lasers for high duty cycle, high-temperature operation // *IEEE. J. Quantum. Electron.* 2002. V. 38, N 6. P. 533–546.
  15. Slocum D.M., Goyette T.M., Slingerland E.J., Giles R.H., Nixon W.E. Terahertz atmospheric attenuation and continuum effects // *Proc. SPIE.* 2013. V. 8716. id. 871607. 14 p. DOI: 10.1117/12.2015471.
  16. Slocum D.M., Slingerland E.J., Giles R.H., Goyette T.M. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects // *J. Quantum. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 127. P. 49–63.
  17. Агеев Б.Г., Матвиенко Г.Г., Пономарев Ю.Н., Чесноков Е.Н. Перспектива использования терагерцового диапазона в атмосферной оптике // *Генерация и применение терагерцового излучения: Сб. трудов Первого рабочего совещания.* Новосибирск, 2006. С. 96–103.
  18. Liebe H.J. MPM – An atmospheric millimeter-wave propagation model // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* 1989. V. 10, N 6. P. 631–650.
  19. Pickett H.M., Poynter R.L., Cohen E.A., Delitsky M.L., Pearson J.C., Muller H.S.P. Submillimeter millimeter and microwave spectral line catalog // *J. Quantum. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 1998. V. 60. P. 883–890.
  20. Чесноков Е.Н., Кошляков П.В., Шмаков А.Г., Коробейников О.П., Князьков Д.А., Якимов С.А. Использование терагерцового излучения лазера на свободных электронах для определения концентрации воды в пламени // *Физ. горения и взрыва.* 2012. Т. 48, № 4. С. 16–22.
  21. Danylov A.A., Waldman J. THz Laboratory Measurements of Atmospheric Absorption Between 6% and 52% Relative Humidity // *Int. STL Report.* Sept., 2006. P. 1–7.
  22. Межерис Р. Лидарное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
  23. 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.
  24. Боровиков А.М., Мазин И.П. Микрофизические характеристики облаков // *Авиационно-климатический атлас-справочник СССР.* М.: Гидрометеониздат, 1975. Вып. 3. Т. 1, ч. 2. С. 127–148.
  25. *Радикация в облачной атмосфере* / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 280 с.
  26. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 1997. 335 с.

**E.G. Kablukova, A.A. Lisenko, G.G. Matvienko, S.V. Babchenko, E.N. Chesnokov. Promises of application of free-electron terahertz laser to remote sensing of the atmosphere.**

The possibility of using the Novosibirsk free-electron laser as a source of terahertz radiation for remote sensing of the near-surface atmosphere is considered. The problem of selection of spectral ranges for sensing is solved in the range 40–250  $\text{cm}^{-1}$ . Numerical experiment on simulation of a signal of terahertz lidar based on the Novosibirsk free-electron laser after signal reflection from the cloud base has been performed for particular initial and boundary optical-geometric conditions and the degree of signal extinction at the sensing path. The sensing range for the cloud base in selected atmospheric transparency windows has been estimated as a function of the specific content of settled water at the sensing path.