

УДК 528.8.044.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛИДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2020 г. В. И. Григорьевский¹, *, **, Я. А. Тезадов¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

*vig248@ire216.msk.su

**vig248@rambler.ru

Поступила в редакцию 20.08.2019 г.

После доработки 03.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

В статье рассматриваются вопросы разрешающей способности оптического лидара по измерению фоновой концентрации метана в атмосфере Земли. С помощью моделирования и экспериментальных исследований было показано, что разрешающую способность по ширине линии поглощения ~ 0.006 нм, а по концентрации метана $\sim 6\%$ от фоновой можно получить при соотношении сигнал/шум для принимаемых сигналов ~ 200 . При экстраполяции результатов на орбитальные измерения горизонтальное разрешение составит ~ 8 км, а вертикальное ~ 1.5 км. Уширение линии излучения передатчика лидара в 2–3 раза заметно не снижает разрешающую способность лидара, что позволяет повысить излучаемую мощность на рассматриваемой длине волны ~ 1653 нм и улучшить энергетический потенциал прибора в целом.

DOI: 10.31857/S0023420620050027

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проявляется большой интерес к глобальному мониторингу парниковых газов, таких как метан и углекислый газ с космических аппаратов оптическими методами. Особенно перспективным кажется направление, использующее активные лазерные дистанционные газоанализаторы в силу их высокой точности определения концентраций примесных парниковых газов. Активное лидарное зондирование лишено недостатков методов пассивного зондирования, требующих, например, присутствия Солнца как источника, и имеющих известные проблемы с тщательной оценкой атмосферных параметров, а также излучательных и отражательных свойств поверхности. Активный метод дает возможность выбора необходимых орбит, отличных от солнечно-синхронных. Европейское космическое агентство ESA и NASA возлагают большие надежды на использование лидаров в задачах определения содержания углекислого газа, метана, скорости ветра с недоступной для пассивных методов точностью. Например, в [1] приводится оценка горизонтального разрешения спутниковых измерений концентрации метана в достаточно широком интервале 50–500 км, при этом погрешность в определении фона метана составит $\sim 2\%$, а для зондирования скорости ветра в глобальном масштабе со спутника

пространственное разрешение, как ожидается составит величину ~ 50 км (https://www.researchgate.net/publication/234346880_The_Adm-Aeolus_Mission_the_First_Wind-Lidar_in_Space).

Проект Merlin по определению глобального распределения метана со спутника, возглавляемый двумя группами из французской LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) и Немецкого института физики атмосферы при дополнительной поддержке нескольких французских и немецких исследовательских институтов на базе Германского центра космических и воздушных полетов (DLR), планируют осуществить в 2021 г. (<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/merlin>). В данном проекте рассматривается возможность измерения интегральной концентрации метана в столбе атмосферы с точностью в единицы процентов. Метод измерений основан на дифференциальном поглощении оптического излучения в линии и вне линии поглощения метана. В передатчике газоанализатора планируется использовать мощный параметрический генератор света с мощностью в импульсе ~ 50 –100 кВт, а в фотоприемнике — высокочувствительный лавинный фотодиод, работающий в диапазоне инфракрасных длин волн ~ 1650 нм. Пространственное разрешение в горизонтальной плоскости такого прибора, как ожидается, состав-

вит ~50 км, определение распределения по вертикали метана в данном методе не планируется, поскольку ширину линии поглощения и концентрацию газа, зависящую от атмосферного давления (а, следовательно, и высоты), определить в данном методе не представляется возможным. Для определения вертикального распределения газа необходим прибор, который определял бы ширину линии поглощения, а также расстояние до отражающей точки на поверхности Земли, чтобы корректно решать обратную задачу [2]. То есть, аппаратура активного лидара по определению распределения газа в пространстве должна осуществлять зондирование атмосферы с борта космического аппарата и, регистрируя отраженный от земной поверхности сигнал, измерять пропускание атмосферы на трассе космический аппарат-Земля и обратно в аналитических полосах поглощения контролируемых газов, расстояние до точки отражения и ширину линии поглощения газа. Однако, разрешающая способность по пространству и по концентрации газа для такого прибора остается неясной.

Целью работы является моделирование и экспериментальное исследование разрешающей способности как по пространству так и по концентрации дистанционного лазерного газоанализатора (лидара), который мог бы с борта космического аппарата измерять не только концентрацию метана, но и его ширину линии поглощения, а также расстояние до точки отражения оптического сигнала, тем самым имея возможность определять распределение примесного газа метана в пространстве.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ ЛИДАРА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Прототипом космического лидара, который мог бы определять вертикальное распределение метана в атмосфере Земли, возможно выбрать газоанализатор с линейно-частотной модуляцией (лчм) задающего лазера с последующим усилением в мощном волоконном рамановском усилителе [2]. Такой газоанализатор был создан и испытан в лаборатории и на приземных трассах. В передатчике лидара был использован рамановский усилитель на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния в кварцевом волокне, в котором мощный сигнал накачки, поступающий в активную среду кварцевого волокна, стимулирует процесс рамановского рассеяния, который обеспечивает сдвиг длины волны излучения накачки в область более длинных длин волн и усиление Stokesовой компоненты. При этом коэффициент усиления Stokesового сигнала зависит от площади сечения, эффективной длины волокна, эквивалентной крутизны усиления оптического усилителя и может достигать величины порядка 100.

Передатчик на выходе усилителя излучал оптическую мощность около 3 Вт на длине волны $\lambda \sim 1653$ нм (линия поглощения метана R_3). Ширина линии излучения передатчика по уровню 3 дБ составляла менее 0.03 нм. Предварительное усиление излучения задающего лазера с распределенной обратной связью (DFB лазер OL6109L-10B) осуществлялось полупроводниковым усилителем Booster Optical Amplifier BOA-15296 до величины ~10 мВт. Блок модуляции осуществлял линейно-частотную модуляцию задающего лазера по синхронизирующим импульсам, поступающим с блока обработки и синхронизации. Сигнал с фотоприемника оцифровывался аналого-цифровым преобразователем и поступал в блок обработки. В используемой схеме имеется возможность определения как расстояния до точки отражения по заднему фронту квазиимпульса [2, 3], так и ширины линии поглощения газа. Ширину линии поглощения в данном методе можно измерить достаточно точно, поскольку принимается и оцифровывается вся линия в интервале сканирования лазерного излучения по частоте. Данная информация позволяет уточнять распределение газа в пространстве. Для выделения линии поглощения газа при измерениях осуществлялись также калибровочные измерения, когда излучение после передающего коллиматора лидара с помощью отражающей поверхности, находящейся рядом с приемопередатчиком, направлялось непосредственно в приёмный объектив, минуя трассу. В газоанализаторе использовался приёмный объектив диаметром 100 мм, а в качестве фотоприемника — лавинный фотодиод IAG-350 (<http://www.lasercomponent.com>) с диаметром чувствительной площадки 350 мкм. Для применения на космическом аппарате параметры по мощности передатчика и по диаметру приемного объектива прибора должны быть увеличены примерно на порядок для достижения приемлемого соотношения сигнал/шум [4]. Формы принимаемых лидаром сигналов: с трассы длиной 1200 м и калибровочного, нормированных на единицу, показаны на рис. 1. Здесь же показана разность этих сигналов, по которой можно судить о форме линии поглощения газа. На сигнале с трассы 1 четко виден “провал” от линии поглощения присутствующего в воздухе метана, поскольку расстояние до точки отражения достаточно большое, а свет сквозь газ проходит двойное расстояние туда и обратно. Нормировка сигнала на единицу осуществлялась в точке A максимального сигнала, которая сдвинута относительно центра линии поглощения на ~0.0007 с по времени или на ~0.05 нм по длине волны выходного излучения. Разностный сигнал это фактически линия поглощения газа, на нем виден острый пик справа от линии поглощения (точка B), который обусловлен запаздыванием сигнала с трассы относительно опорного калибровочного

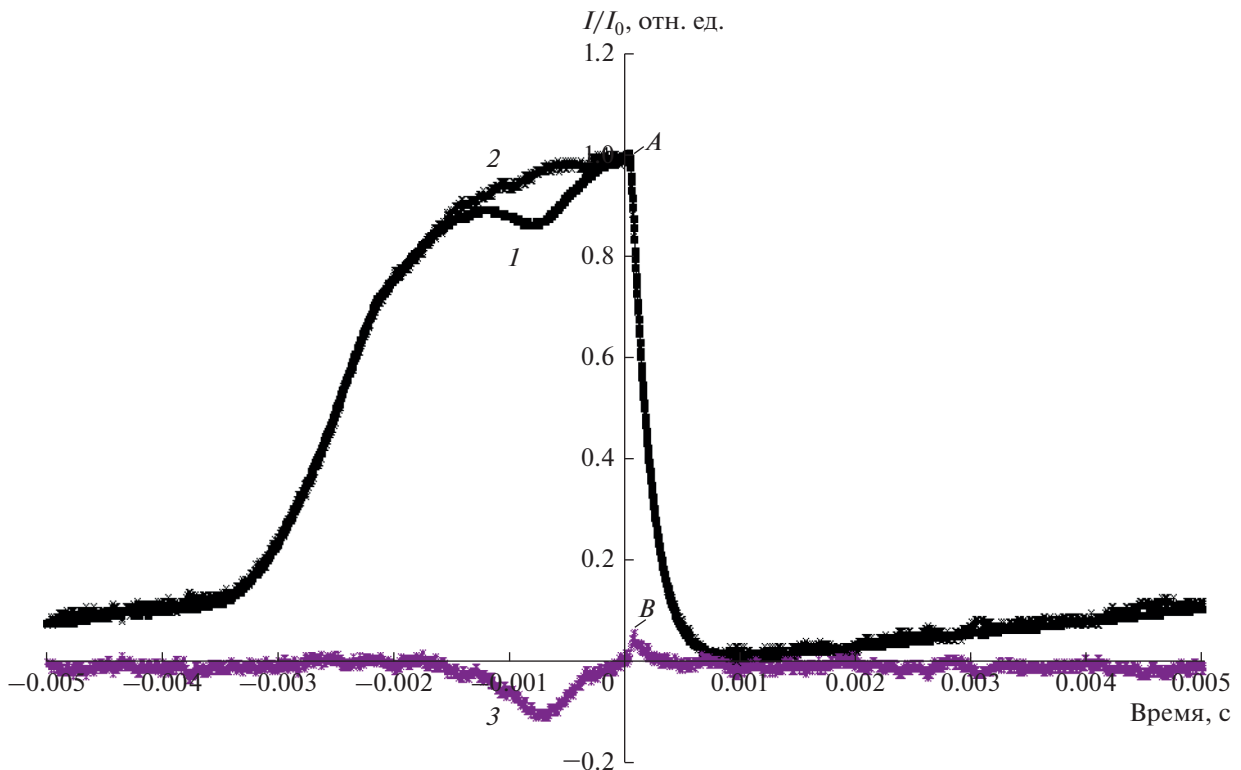


Рис. 1. Форма сигналов лидара: 1 – сигнал с трассы, 2 – калибровочный сигнал, 3 – разность сигналов 2 и 1.

сигнала. Время этого запаздывания соответствует двойному измеряемому расстоянию до точки отражения, которое измеряется прибором. Как видно из рисунка, форма калибровочного и сигнала с трассы отличаются от линейной, что обусловлено частичным насыщением усилителя передатчика, конечной шириной его линии излучения, а также конечным временем интегрирования фотоприемника. Ширина линии излучения передатчика составляла менее 0.03 нм, а время интегрирования фотоприемника ~0.1 мс. Уменьшать эти величины нежелательно, поскольку при этом принимаемый сигнал будет невелик из-за малого усиления фотоприемника и небольшой выходной мощности передатчика. Оба эти фактора снижают соотношение сигнал/шум прибора. Согласно закону Бугера интенсивность излучения, прошедшего через атмосферный слой, записывается в виде:

$$I/I_0 = \exp(-\alpha CL), \quad (1)$$

где I – интенсивность прошедшего света, I_0 – интенсивность падающего света; α – коэффициент поглощения газа, C – концентрация метана в ppm (частей на миллион), L – длина атмосферной трассы. Ширина спектральной линии поглощения газа зависит, в основном, от давления атмосферного воздуха, а коэффициент поглощения α

(форма линии) может быть аппроксимирован контуром Лоренца:

$$\alpha(\nu) = N_0 \sigma(\nu) = N_0 \sigma(\nu_0) / \left(1 + \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\gamma^2} \right), \quad (2)$$

где N_0 – количество молекул в единице объема ($N_0 = 2.6875 \times 10^{25} \text{ 1/м}^3$ – число Лошмидта), $\sigma(\nu)$ – поперечное сечение поглощения, $\nu = 2\pi/\lambda$ – волновое число (λ – длина волны излучения), ν_0 – волновое число в максимуме линии поглощения, γ – полуширина линии поглощения на полувысоте ее амплитуды. Согласно базе HITRAN ширина линии поглощения метана на длине волны 1653.73 нм, на которой проводились измерения составляет ~0.0618 нм, а сечение поглощения на этой длине волны – $\sigma(\nu_0) \sim 10^{-20} \text{ см}^2$. Лидар измеряет L и величину I/I_0 в диапазоне полосы регистрации ~0.5 нм, оцифровывая принятые сигналы с тактовой частотой около 1 МГц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛИДАРА

На рис. 2 графически представлены три нормированные на единицу графика зависимости I/I_0 в диапазоне указанного интервала длин волн для расстояния 1200 м, вычисленные по формуле (1) с

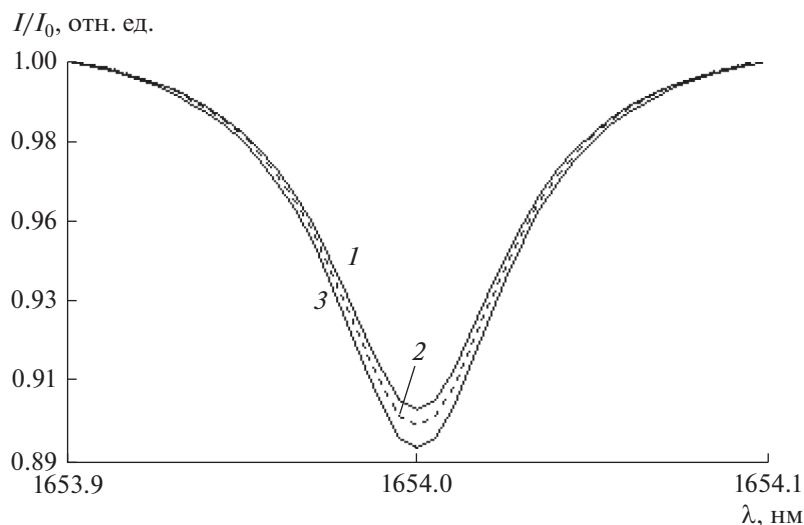


Рис. 2. Нормированные линии поглощения для трех значений фона метана. 1 – 1.7 ppm, 2 – 1.8 ppm, 3 – 1.9 ppm.

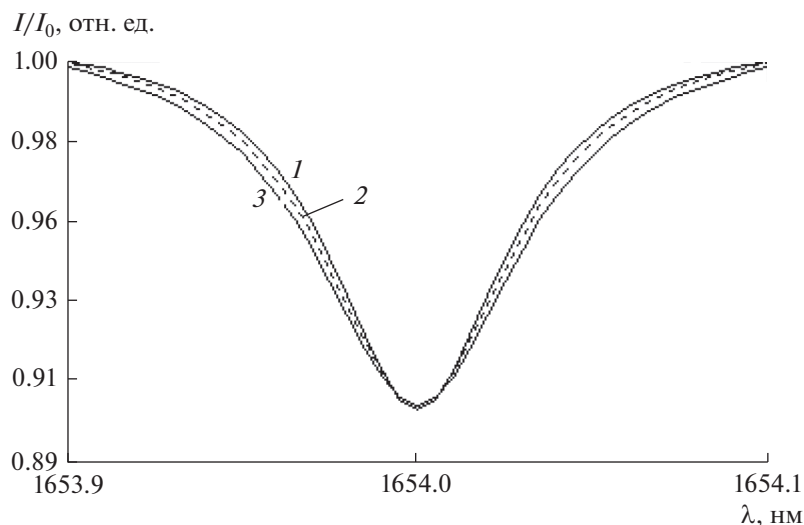


Рис. 3. Нормированные линии поглощения метана для различных 2γ : 1 – 0.06 нм, 2 – 0.065 нм, 3 – 0.07 нм.

учетом (2), причем для каждой из трех кривых варьировалась концентрация C , входящая в (1). Концентрации метана для каждой из трех кривых отличаются на 0.1 ppm, то есть для фоновой концентрации метана в атмосфере Земли, равной 1.7 ppm это составляет примерно 6%. Как видно из графика, кривые в точке минимума линии поглощения метана расходятся на величину ~ 0.005 – 0.006 , поэтому, чтобы они были различимы при измерениях, необходимо обеспечить соотношение сигнал/шум в принятом сигнале ~ 170 – 200 . На рис. 3 построены графики для этого же расстояния зондирования с одинаковой концентрацией $C = 1.7$ ppm, но разными 2γ отличающимися на 0.005 нм друг от друга, что составляет от ширины

линии поглощения по половинному уровню примерно 8%. Графики построены также по формуле (1) с учетом (2). При одной и той же длине волны (абсциссе), соответствующей примерно половинной амплитуде, кривые расходятся на величину ~ 0.005 – 0.004 отн. ед. по вертикальной оси, поэтому для обеспечения необходимой чувствительности соотношение сигнал/шум должно быть не менее 250–200. То есть, для чувствительности (разрешающей способности) описываемого лидара в 5% по концентрации и 8% по ширине линии поглощения, соотношение сигнал/шум в принятом сигнале должно составлять порядка 200–250 единиц и это достаточно высокие требования к “чистоте” принимаемого сигнала. Для

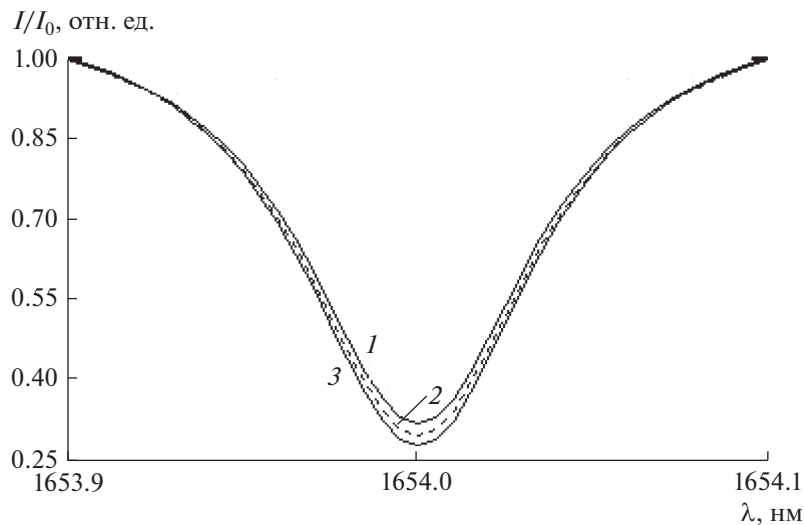


Рис. 4. Нормированные линии поглощения для трех значений фона метана при зондировании с космической орбиты: 1 – 1.7 ppm, 2 – 1.8 ppm, 3 – 1.9 ppm.

сигнала, изображенного на рис. 1 и полученного за время усреднения ~ 1 с, соотношение сигнал/шум составляет величину ~ 50 , поэтому, для надежного измерения малых изменений концентраций и ширины линии поглощения для приведенных в эксперименте условий требуется время усреднения ~ 16 с или 16 реализации односекундных сигналов, поскольку сигнал/шум увеличивается как корень квадратный с увеличением времени измерения.

Средняя ширина линии поглощения при измерениях на вертикальных трассах определялась по барометрической формуле с учетом весовой функции $f(N)$ как:

$$2\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_0 f(N) \exp(-N/89), \quad (3)$$

где $2\gamma_0 = 0.0618$ нм – ширина линии поглощения в приземном слое атмосферы, а N – номер слоя атмосферы при вертикальном просвечивании. Величина $f(N)$ – это весовая функция относительного распределения фона метана по высоте. Она описывается графиком, приведенным в [5], из которого следует, что относительная концентрация метана в воздухе до высоты ~ 10 км постоянна, а далее уменьшается. Для приземного слоя атмосферы вплоть до высот 10 км $f(N) = \text{const} = 1.7$ ppm и формула (3) упрощается, если высоты зондирования не превышают указанной величины. При расчете по этой формуле 8%-ое изменение ширины линии поглощения происходит при изменении высоты на ~ 1.5 км, поэтому можно ожидать, что разрешение описываемого лидара по высоте при измерении концентрации метана составит такую же величину. Если бы полученные на приземных трассах интегральные концен-

трации ~ 3 мм осажденного слоя измерялись с космических орбит, то время усреднения 16 с позволило бы получить горизонтальное разрешение ~ 128 км по горизонтали, если считать скорость движения спутника ~ 8 км/с и 1.5 км по вертикали. Однако, когда зондируется вся толща атмосферы с космического аппарата интегральные концентрации метана гораздо больше и “провал” на линии поглощения метана становится также больше. На рис. 4 представлены формы линии поглощения метана для эффективного двойного расстояния 24 км горизонтальной трассы с постоянной концентрацией 1.7 ppm, причем это расстояние соответствует интегральному содержанию метана на двойной трассе Земля-спутник. Двойное расстояние 24 км больше на порядок, чем в случае рассмотренной выше приземной трассы. Видно, что “провал” на линии поглощения опускается до величины ниже 0.4, то есть его величина увеличивается более чем в 6 раз по сравнению со случаем приземной трассы, где “провал” снижается от 1 всего до ~ 0.9 отн. ед., рис. 2. Так для сигналов, показанных на рис. 4, когда концентрации фона метана составляют, как и в случае приземной трассы 1.9, 1.8 и 1.7 ppm, линии на графике расходятся в точке минимума на величину ~ 0.02 , а не 0.005, т.е. на величину в 4 раза большую. В силу этого, для разрешения по концентрации в ~ 0.1 ppm и ~ 0.004 нм по ширине линии поглощения, сигнал/шум может составлять величину в 4 раза меньшую, то есть время накопления сигнала может быть снижено соответственно в 16 раз, до 1 с. Поэтому, можно ожидать, что разрешающая способность лидара при просвечивании всей толщи атмосферы с космического аппарата будет составлять величину ~ 8 км по горизонтали, при этом вертикальное разрешение оста-

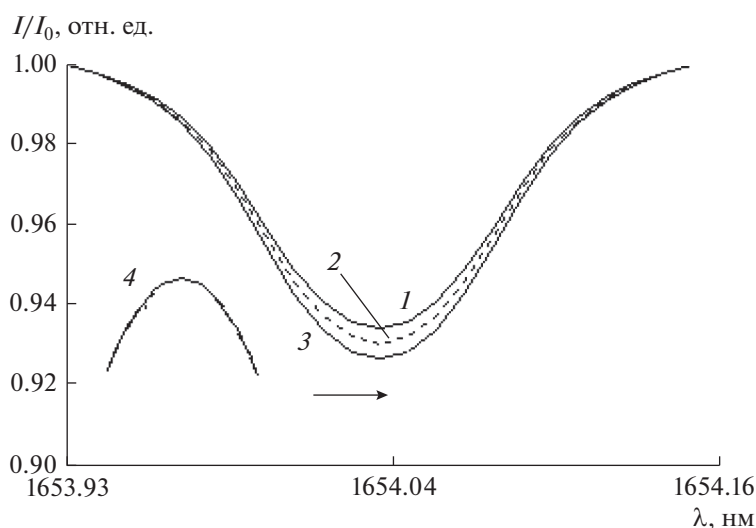


Рис. 5. Нормированные линии поглощения для трех значений фона метана при зондировании на горизонтальной трассе с учетом уширения линии излучения передатчика лидара до 0.08 нм: 1 — 1.7 ppm, 2 — 1.8 ppm, 3 — 1.9 ppm, 4 — линия излучения передатчика. Стрелкой показано перемещение линии излучения по линии поглощения в процессе измерений.

нется равным ~ 1.5 км. Если проводить усреднение в течение 16 с, то можно измерять концентрацию с точностью $\sim 1\%$, а разрешение по горизонтальной координате при таком разрешении по концентрации составит ~ 128 км при пространственном разрешении по вертикали лучше 0.4 км.

Для повышения принимаемого лидаром сигнала и увеличения его энергетического потенциала желательно увеличивать выходную мощность лазерного излучателя, однако при этом в силу нелинейных эффектов в волокне рамановского преобразователя оптического усилителя ширина линии излучения расширяется. Возникает вопрос: как сказывается эффект расширения линии излучения на параметры разрешающей способности лидара в целом. Для моделирования этого эффекта была рассчитана величина I/I_0 в диапазоне длин волн по следующей формуле:

$$I/I_0 = \int_{\lambda-\Delta}^{\lambda} \left(\exp(-N_0 \sigma(v_0) CL / \left(1 + \frac{(v - v_0)^2}{\gamma}\right)) \right) dv, \quad (4)$$

где $\Delta = 0.08$ нм — ширина излучаемой лазерной линии, остальные обозначения аналогичны обозначениям формул (1) и (2). То есть, фактически вычислялись принимаемые сигналы I/I_0 с учетом интегрирующего действия линии излучения передатчика, причем для упрощения вычислений форма линии излучения принималась прямоугольной. Результаты расчета представлены на рис. 5. При таком интегрировании для концентрации 1.7, 1.8, 1.9 ppm в случае трассы длиной 1200 м на длине волны минимума сигнала величины “провалов” равны соответственно: 0.935, 0.931, 0.927. Линии на графике расходятся в точке ми-

нимума на величину ~ 0.004 . То есть, чувствительность к измерению величины концентрации уменьшается на $\sim 20\%$ по сравнению со случаем без интегрирования. При этом несколько увеличивается минимум принимаемого сигнала в максимуме поглощения. Как показывает расчет, аналогичная картина наблюдается и в случае зондирования метана с космического аппарата: чувствительность к измерениям уменьшается также на $\sim 20\%$. Мощность же на выходе рамановского усилителя при ширине линии 0.08 нм можно получить в $\sim 2-3$ раза больше, чем в случае линии излучения с шириной 0.03 нм, т.е. выигрыш в соотношении сигнал/шум может составить более 2 раз. Исходя из полученных результатов, можно сказать, что увеличение мощности передатчика при условии, что ширина линии его излучения не превысит 0.08 нм, в конечном итоге может дать выигрыш по соотношению сигнал/шум более чем 2 раза, а, следовательно, примерно такое же улучшение в разрешающей способности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Лидар с характеристиками представленными в разделе 1 работал на горизонтальной трассе при отражении света от листвы деревьев и на вертикальной трассе, когда свет отражался от облаков. Для проверки чувствительности лидара на горизонтальной трассе он наводился на первую мишень на расстоянии 600 м, а затем на мишень на расстоянии 300 м. Проводилась и калибровка, когда мишень находилась рядом с приемопередатчиком. На графике, рис. 6 представлены полученные результаты. Для расстояния 600 м концентрация оказалась равной 1.05 мм осажденного слоя.

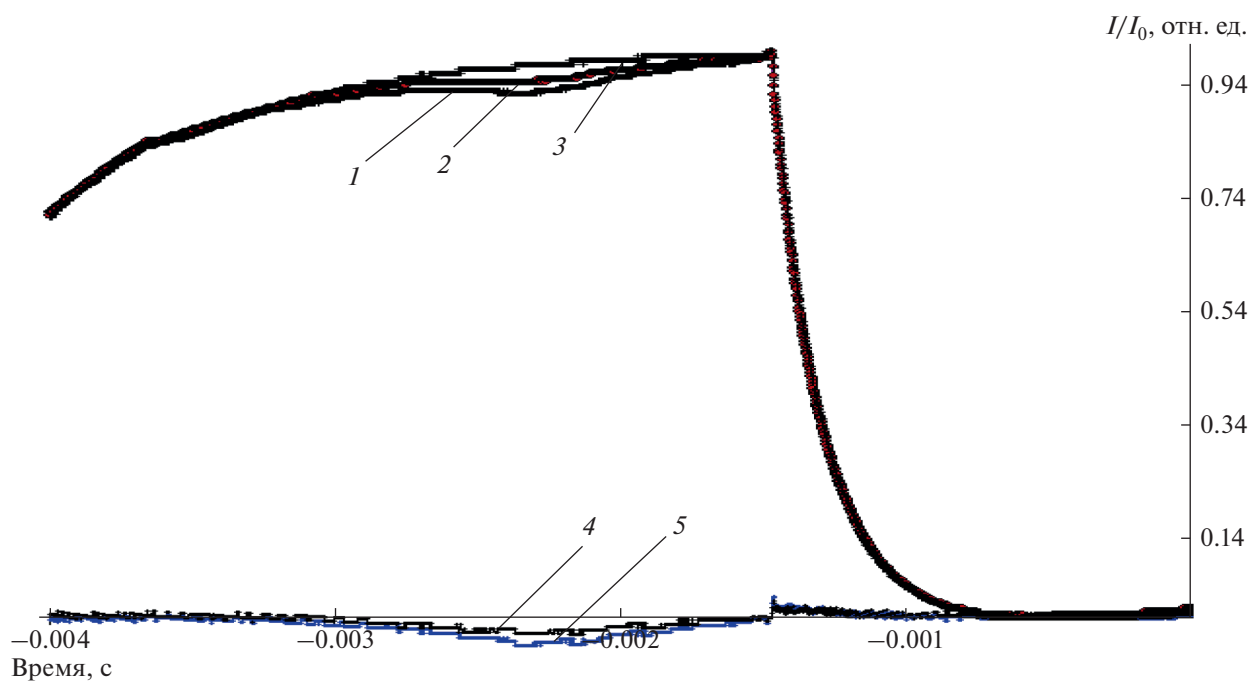


Рис. 6. Экспериментальные результаты по измерению метана на трассах 600 и 300 м. 1 – 600 м, 2 – 300 м, 3 – 0 м (калибровка), 4 – разность сигналов 2 и 3, 5 – разность сигналов 1 и 3.

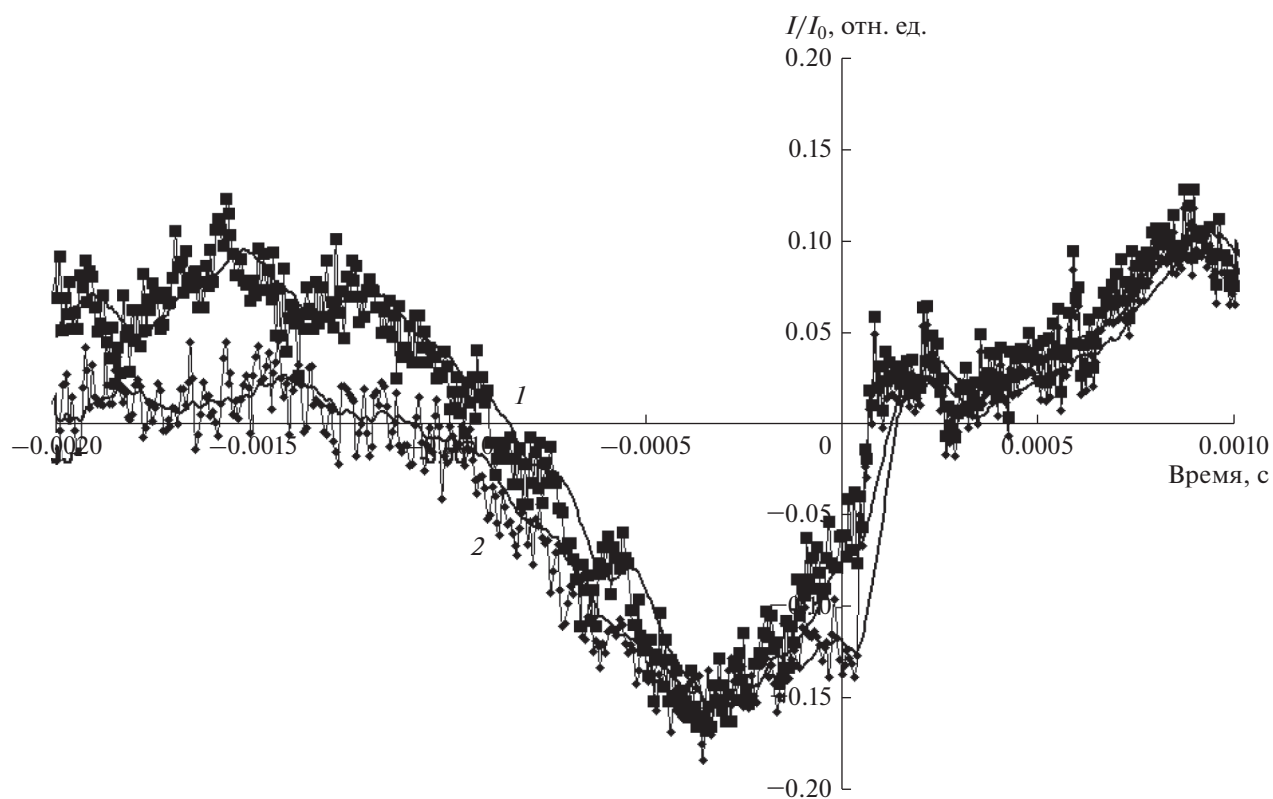


Рис. 7. Экспериментальные результаты по измерению ширины линии поглощения газа на трассах 1500 и 3400 м с отражением от облачных слоев: 1 – результат усреднения шестнадцати 1-секундных реализаций для облачных слоев на высоте 3400 м, 2 – результат усреднения шестнадцати 1-секундных реализаций для облачных слоев на высоте 1500 м.

При фоне 1.7 ppm теоретическое значение на этом расстоянии составляет величину 1.02 мм осажденного слоя метана. Учитывая погрешности в измерениях, можно сказать, что согласие теоретических и экспериментальных значений достаточно хорошее. Для расстояния 300 м полученный из измерений осажденный слой метана оказался равным 0.53 мм (теоретическое значение 0.51 мм). Разность между полученными величинами осажденного слоя на двух трассах составила величину 0.52 мм, что совпало с точностью 2% с теоретическим значением: 0.51 мм. Как было выяснено ранее, для обнаружения величины разницы в фоновой концентрации в 0.1 ppm (~ 0.034 мм осажденного слоя метана на расстоянии ~ 340 м) необходимо обеспечить соотношение с/ш ~ 170 –200. В проведенном эксперименте соотношение сигнал/шум составляло около 100 и этого оказалось достаточно для обнаружения разности в 0.52 мм осажденного слоя газа, что находится в хорошем согласии с теоретическим моделированием.

Для проверки моделирования по измерению ширины линии поглощения газа проводились измерения на вертикальной трассе с Земли. Отражение оптического сигнала осуществлялось от сравнительно однородных облачных слоев, располагающихся на высотах около 3.4 км (высокий облачный слой) и 1.5 км (низкий облачный слой). Было проведено по 25 одноканальных измерений как концентрации газа на данных трассах, так и ширины линии поглощения метана. На рис. 7 представлены итоговые результаты по измерениям. Из графика видно, что 16 реализаций одноканальных измерений достаточно, чтобы с нужной точностью измерить ширину линии поглощения. Для наглядности графики были сглажены с помощью линейной фильтрации по 16 точкам (экстраполирующие кривые показаны на том же графике). Видно, что ширина линии поглощения метана имеет меньшую ширину при работе по высокому облачному слою. Величина ширины линии оказалась равной 0.054 нм, теоретическая величина, рассчитанная по формуле (4) дает значение 0.051 нм. Ширина линии при работе по низкому облачному слою оказалась равной 0.058 нм, а вычисленная по формуле (4) – 0.057 нм. Как видно из полученных данных, теоретическая разность в 0.006 нм в ширине линии поглощения была определена экспериментально как 0.004 нм в течение 16 с. Отличие теоретических данных от экспериментальных результатов можно объяснить некоторой неточностью определения высоты точки отражения в облачных слоях и погрешностями измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные результаты теоретического моделирования определения разрешающей способности оптического лидара как по горизонтали, так и по вертикали удовлетворительно согласуются с данными экспериментальных исследований. Полученные в наземных условиях результаты показывают, что при соотношении сигнал/шум ~ 100 –200 разницу в ~ 0.51 мм осажденного слоя метана на горизонтальных трассах можно обнаружить на расстояниях ~ 300 м, а разницу в ширине линии поглощения в 0.006 нм можно обнаружить на разности высот ~ 1.9 км при временах усреднения ~ 16 с. Поскольку результаты наземного эксперимента удовлетворительно согласуются с результатами теоретического моделирования, то при измерениях с борта космического аппарата можно ожидать также удовлетворительного согласия с результатами моделирования величины разрешающей способности, которая, как ожидается, составит величину ~ 8 км в горизонтальной плоскости и ~ 1.5 км в вертикальной плоскости при просвечивании всей толщи атмосферы за 1 с и соответственно 128 и 0.4 км за 16 с. Естественно, такие результаты возможны при соответствующих энергетических характеристиках лидара: примерно 30 Вт выходной мощности излучателя и диаметре приемного объектива ~ 1 м. Уширение линии излучения передатчика лидара в 2–3 раза позволяет увеличить мощность передатчика во столько же раз, что может обеспечить и лучшую разрешающую способность лидара.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ehret G., Kiemle C. et al. Space-borne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis // Appl. Phys. 2008. V. 90. P. 593–608.
2. Григорьевский В.И., Садовников В.П. Дистанционный волоконно-лазерный газоанализатор-лидар для задач мониторинга метана в атмосфере // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 2. С. 16–22.
3. Grigorievsky V.I., Tezadov Ya.A., Elbakidze A.V. Modeling and investigation of high-power fiber-optical transmitters for lidar applications // J. Russian Laser Research. 2017. V. 38. № 4. P. 311–315.
4. Акимов Г.А., Григорьевский В.И., Матайбаев В.В. и др. Увеличение энергетического потенциала лидара для контроля метана на основе квазинепрерывного источника излучения // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 10. С. 1010–1014.
5. Бажин Н.М. Метан в окружающей среде. Новосибирск: РАН, 2010.