

Ю.Ф. Аршинов, С.М. Бобровников, А.Г. Попов, Д.И. Шелефонтюк, В.К. Шумский

**ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ
КОМПОНЕНТОВ АТМОСФЕРЫ В <СОЛНЕЧНО-СЛЕПОЙ>
ОБЛАСТИ СПЕКТРА КР-ЛИДАРОМ**

Представлен анализ работы КР-лидара для обнаружения загрязняющих газовых выбросов в атмосферу с применением ультрафиолетового зондирующего излучения. Показано, что в <солнечно-слепой> области существует довольно сильная спектральная зависимость дальности обнаружения загрязняющих газов при фиксированной их концентрации и что есть участки спектра, оптимальные для работы УФ-КР-лидара с точки зрения дальности обнаружения.

Необходимость осуществления круглосуточных наблюдений за состоянием атмосферы как для практической метеорологии, так и для ряда атмосферно-физических задач предъявляет более жесткие требования к вновь разрабатываемым оптическим методам контроля параметров атмосферы. К таким методам относятся все без исключения лидарные методы. Каждый лидарный метод, в свою очередь, в той или иной степени страдает от воздействия оптических помех, основным источником которых является солнечное излучение. Очевидно, что при работе в дневных условиях главной задачей обеспечения работоспособности лидара является задача подавления фона, обусловленного рассеянием солнечного излучения в атмосфере. Что касается самого лидара как лазерно-локационного устройства, то здесь достаточно просто выделить основные общие факторы, определяющие помехоустойчивость системы в целом. К ним относятся:

1. Энергия импульса зондирующего излучения.
2. Средняя мощность зондирующего излучения.
3. Угол поля зрения приемной оптической системы.
4. Ширина полосы пропускания приемной оптической системы.
5. Ширина полосы пропускания фотодетектора.

Естественно, что каждый из перечисленных выше параметров лидара имеет свое определенное значение. Так, например, энергия зондирующего импульса может быть ослаблена и по технологическим требованиям и по причине создания условий для безопасности глаз. Угол поля зрения, как правило, ограничивается как кружком рассеяния приемной оптической системы, так и турбулентным размытием пространственно ограниченного лазерного пучка.

Очевидно, что не имеет смысла делать оптическую полосу пропускания приемника уже, чем спектр принимаемого излучения. В идеальном случае вид функции пропускания приемной системы должен совпадать с видом спектра принимаемого излучения.

Выбор параметров лидара в соответствии с требованиями работы в дневных условиях позволяет в ряде случаев построить системы, имеющие достаточный радиус действия днем. Как правило, это лидары, использующие несмещенное рассеяние, – аэрозольные, дифференциального поглощения, корреляционные. Очевидно, что в ночных условиях потенциалы этих систем существенно возрастают. Наиболее общий подход, содержащий методику оценки потенциала лидара с учетом ряда факторов, был предложен Б.В. Каулем в [1]. Пользуясь этой методикой, можно оценить возможности той или иной лидарной системы с точки зрения ее работоспособности, в том числе и днем.

Однако в том случае, когда в лидарной методике используется более слабый по сравнению с аэрозольным рассеянием эффект [например, спонтанное комбинационное рассеяние (СКР)], то даже при реализации предельных значений параметров системы не удастся добиться достаточного потенциала лидара при работе днем.

Единственным, казалось бы, очевидным выходом из этой ситуации является осуществление работы лидара в так называемой <солнечно-слепой> области спектра (где излучение Солнца надежно поглощается озоновым слоем), в этом случае в тропосфере реализуются ночные условия. Однако наличие тропосферного озона и кислорода является существенным фактором, влияющим на условия работы лидара в этой области спектра.

В связи с этим было бы полезно рассмотреть более детально вопрос об условиях распространения в тропосфере излучения ультрафиолетового (УФ) диапазона длин волн. Как известно [2], полосы поглощения в УФ-области спектра определяются электронными переходами таких составляющих атмосферы, как O_2 , O , N_2 , N и O_3 . Все эти компоненты играют важную роль в фотохимических процессах в средней атмосфере, однако в переносе излучения в интересующем нас диапазоне длин волн (200–300 нм) заметную роль играют лишь озон и кислород.

Озон имеет в рассматриваемом диапазоне длин волн интенсивную полосу поглощения (полоса Хартли), благодаря чему даже малое (на уровне фоновых концентраций) содержание озона в тропосфере приводит к заметному ослаблению излучения. Молекулярный кислород начинает существенно препятствовать распространению излучения с длиной волны короче 240 нм за счет поглощения континуумом Герцберга, который тянется до 200 нм, а затем переходит в континуум Шумана–Рунге, интенсивность поглощения в котором полностью исключает использование в атмосфере излучения с длиной волны короче 200 нм.

Заметный вклад в ослабление в коротковолновой части УФ-диапазона вносит также молекулярное рассеяние.

На рис. 1 представлены результаты расчета коэффициентов экстинкции в интервале длин волн 200–320 нм для основных ослабляющих факторов тропосферы по экспериментальным данным о сечениях поглощения для O_2 и O_3 и сечению молекулярного рассеяния [3, 4]. Содержание озона было принято равным 40 млрд^{-1} , кислорода 21%. Поведение кривых демонстрирует вклад каждого из ослабляющих компонентов в общее ослабление в зависимости от длины волны. Следует отметить некоторые особенности поведения кривой суммарного ослабления (кривая 4), на которой можно выделить три участка.

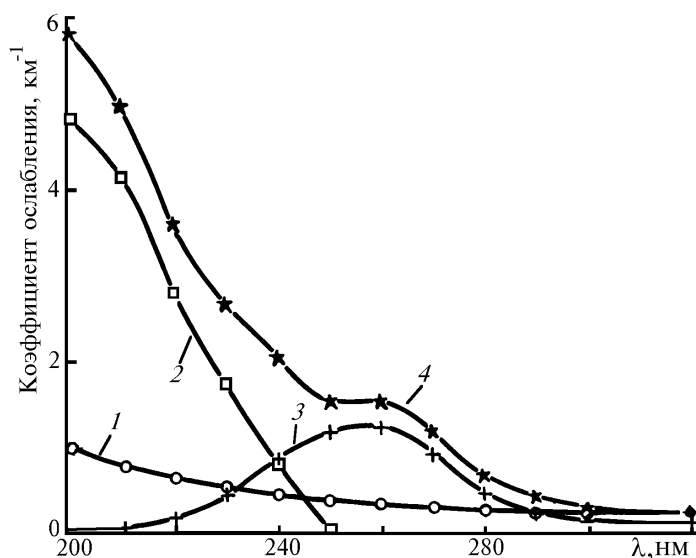


Рис. 1. Спектральный ход коэффициентов экстинкции для основных ослабляющих факторов тропосферы в УФ-диапазоне длин волн: 1 – молекулярное рассеяние; 2 – поглощение в континууме Герцберга кислородом ($n_{O_2} = 21\%$); 3 – поглощение в полосе Хартли озоном ($n_{O_3} = 40 \text{ млрд}^{-1}$); 4 – суммарный коэффициент ослабления

Первый участок, соответствующий спектральному интервалу 200–250 нм, характеризуется быстрым ростом ослабления с $1,4$ до $5,8 \text{ км}^{-1}$ с уменьшением длины волны. Очевидно, что использование этого интервала длин волн при реализации лидарной методики связано с большими энергетическими потерями, а также с возможными методическими трудностями, обусловленными большим различием величины ослабления в соседних участках спектра.

Второй характерный участок соответствует спектральному интервалу 250–265 нм. При не слишком большом ослаблении ($1,4 \text{ км}^{-1}$) на этом интервале, очевидно, в ряде случаев можно пренебречь спектральным ходом прозрачности (даже при вариациях содержания озона).

Третий участок примечателен относительно плавным уменьшением ослабления до значений, характерных для молекулярного рассеяния. Очевидно, что кривая спектрального хода суммарного коэффициента ослабления имеет вполне конкретный практический смысл с точки зрения оценки потенциала лидарной системы, работающей в тропосфере в <солнечно-слепой> области спектра.

Перейдем далее к непосредственному рассмотрению <солнечно-слепой> области УФ-диапазона длин волн. Как уже отмечалось выше, наличие стратосферного озонового слоя не позволяет солнечному излучению пробиться к поверхности земли, обеспечивая таким образом <ночные условия> работы оптических систем в некотором интервале длин волн. Очевидно, что полосы поглощения молекулярного кислорода также вносят свой вклад в ослабление солнечного излучения в коротковолновой части спектра. Зная общее содержание как озона, так и кислорода в вертикальной толще атмосферы и используя данные о сечениях поглощения в полосе Хартли для O_3 и в континууме Герцберга для O_2 , можно рассчитать оптическую плотность вертикальной толщи атмосферы в интересующем нас интервале длин волн. Результаты такого расчета представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, вертикальная толща атмосферы для длин волн короче 280 нм имеет огромную оптическую плотность τ , которая в максимуме ($\lambda_m = 260 \text{ нм}$) превышает 100.

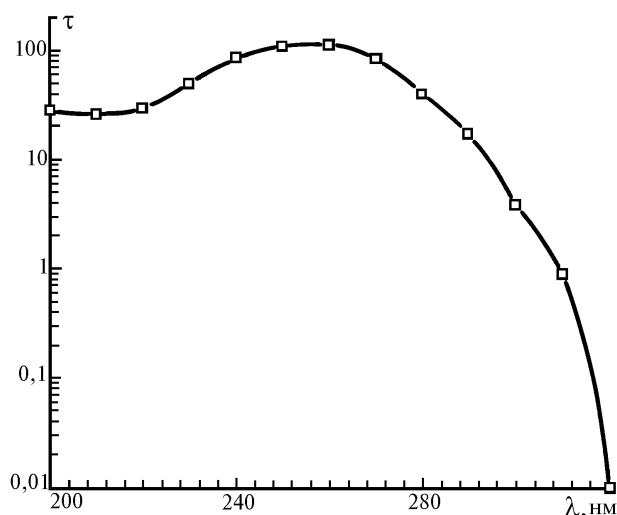


Рис. 2. Оптическая плотность вертикальной толщи атмосферы с учетом поглощения молекулярным кислородом и стратосферным озоном (общее содержание озона принято равным 0,4 см)

Для того чтобы оценить уровень ослабления солнечного излучения, удобнее рассмотреть спектральный ход прозрачности $T(\lambda) = e^{-\tau(\lambda)}$ в этом же интервале длин волн. Здесь и далее для простоты рассуждений рассматривается ослабление солнечного излучения вертикальной толщей атмосферы, т.е. для нереального в наших широтах случая малых зенитных расстояний Солнца. Очевидно, что для больших зенитных расстояний, которые реализуются на практике, ослабление будет еще значительней. Спектральный ход прозрачности представлен на рис. 3.

Горизонтальными штриховыми линиями показаны границы дневных и ночных условий, где уровень ночи соответствует ослаблению излучения на 8 порядков [5]. При этом можно определить некоторую длину волны λ , являющуюся <красной границей> <солнечно-слепой> области спектра, слева от которой будет <ночь>, а справа – <сумерки> и <день>. Спектральная область <вечно сумеречного неба> заключена в промежутке между вертикальными штриховыми линиями и ограничена справа значениями λ_n . По выбранному нами критерию $\lambda_n = 290 \text{ нм}$, $\lambda_d = 320 \text{ нм}$.

Таким образом, можно дать определение <солнечно-слепой> области спектра как некоторого интервала длин волн $\lambda \in [200, 290]$ нм, внутри которого реализуются <ночные> условия освещенности [левая граница интервала (200 нм) выбрана здесь из соображений катастрофического возрастания потерь за счет поглощения в континууме Шумана–Рунге кислорода для длин волн короче 200 нм].

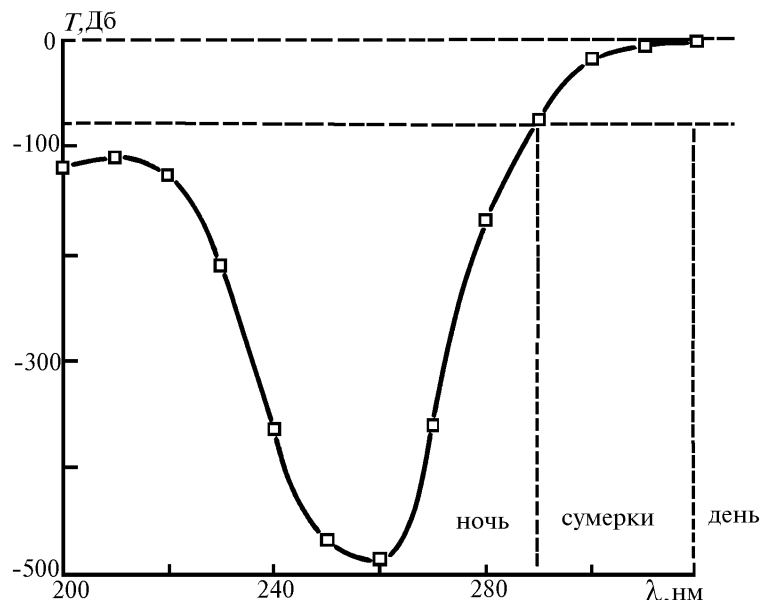


Рис. 3. Ослабление излучения вертикальной толщей атмосферы. Штриховыми линиями выделен уровень ослабления 10^{-8} , соответствующий ночным условиям освещенности

Из рис. 3 видно, что ослабление излучения внутри <солнечно-слепой> области существенно неравномерно, однако уровень ослабления столь велик, что в большинстве практических случаев влиянием фона солнечного излучения внутри рассматриваемой области можно пренебречь.

Как уже отмечалось выше, молекулярный кислород и озон, присутствующие в тропосфере, несколько ограничивают перспективы использования коротковолновой части <солнечно-слепой> области. Для того чтобы выяснить действительные возможности круглосуточной работы конкретной лидарной системы и определить ее потенциал, реализующийся в различных участках <солнечно-слепой> области, полезно провести некоторый численный эксперимент, для которого у нас теперь есть все необходимые данные (см. ниже).

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КР-ЛИДАРА

Диаметр приемной апертуры, м	0,5
Ширина аппаратного контура монохроматора, см ⁻¹	8
Пропускание приемного тракта	0,1
Квантовая эффективность фотодетектора	0,1
Угол поля зрения приемной оптической системы, мрад	0,3
Средняя мощность лазерного излучения, Вт	10
Время накопления, мин.	30
Пространственное разрешение, м.	10

На рис. 4, 5, 6 приведены результаты численного эксперимента по определению дальности обнаружения СКР-лидаром малой концентрации окиси углерода CO и двуокиси серы SO₂ в зависимости от длины волны зондирующего излучения для трех значений энергии лазерного импульса при постоянной средней мощности излучения. При этом в качестве критерия обнаружения было принято условие накопления 10 сигнальных фотоотсчетов. Очевидно, что рис. 4 и 5 имеют много общего. Подобные зависимости могут быть рассчитаны для любого газа, частотный сдвиг и сечение КР для которого известны. На рисунках хорошо видно, что для <сумеречного> интервала длин волн, где фон солнечного излучения подавлен атмосферой лишь частично, наблюдается зависимость дальности обнаружения от энергии лазерного им-

пульса. Однако существует некоторое значение длины волны возбуждающего излучения λ_n , начиная с которого, при продвижении в более коротковолновую часть спектра, определяющим становится только средняя мощность излучения.

Именно эта длина волны определяет <красную границу> <солнечно-слепой> области в соответствии с выбранным критерием. Очевидно, что для каждого газа будет своя <красная граница> в соответствии с его романовским частотным сдвигом. Разница в частотном сдвиге так же, как и отличие в дальности обнаружения для CO и SO₂, видны из рис. 6.

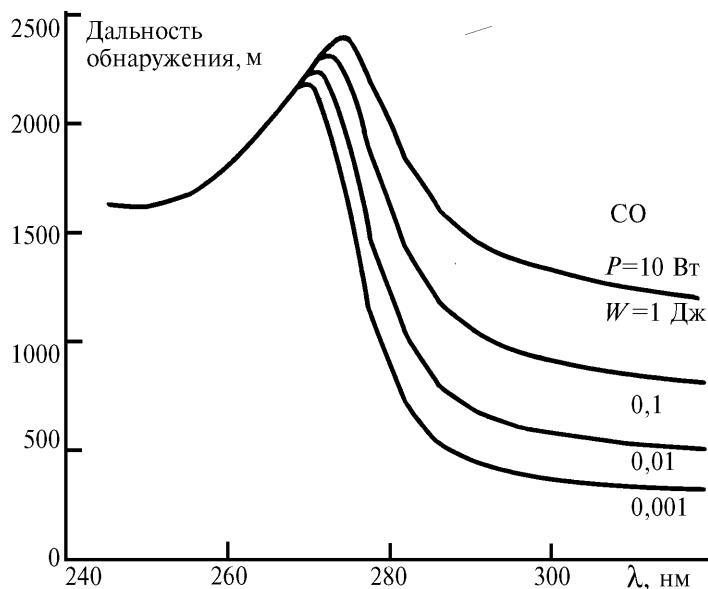


Рис. 4. Дальность обнаружения окиси углерода ($n = 100 \text{ млн}^{-1}$) КР-лидаром в зависимости от длины волны возбуждающего излучения, днем, для различных значений энергии зондирующего импульса W

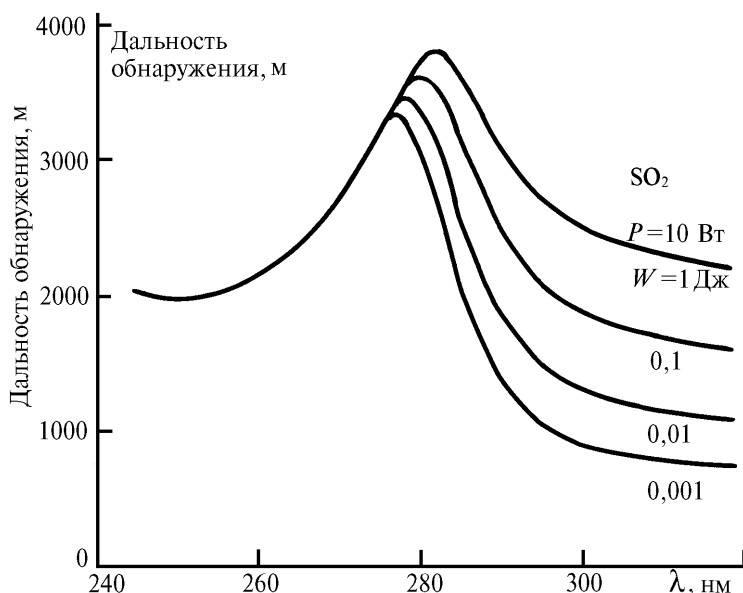


Рис. 5. Дальность обнаружения SO₂ ($n = 100 \text{ млн}^{-1}$) КР-лидаром в зависимости от длины волны возбуждающего излучения, днем, для различных значений энергии зондирующего импульса

Таким образом, проанализировав некоторые возможности использования <солнечно-слепого> диапазона УФ-излучения с точки зрения осуществления круглосуточной работы КР-лидара, можно сделать общий вывод о том, что понятие <солнечно-слепого> диапазона явля-

ется относительным. Красная граница <солнечно-слепой> области определяется видом спектра КР. При этом энергетически выгодно выбирать длину волны возбуждающего излучения как можно ближе к <красной границе>, поскольку в этом случае потери за счет поглощения тропосферным озоном будут минимальны (см. положения максимумов на кривых рис. 4–6). Очевидно, что это условие невозможно выполнить для нескольких газов одновременно, поэтому определяющим в выборе длины волны возбуждающего излучения будет газ, имеющий наибольший частотный сдвиг СКР. Тем не менее переход в <солнечно-слепую> область УФ-диапазона несет ощутимые преимущества, связанные с повышением чувствительности и дальности обнаружения загрязняющих компонентов, при этом неизбежно возникающие потери компенсируются возрастанием сечения КР.

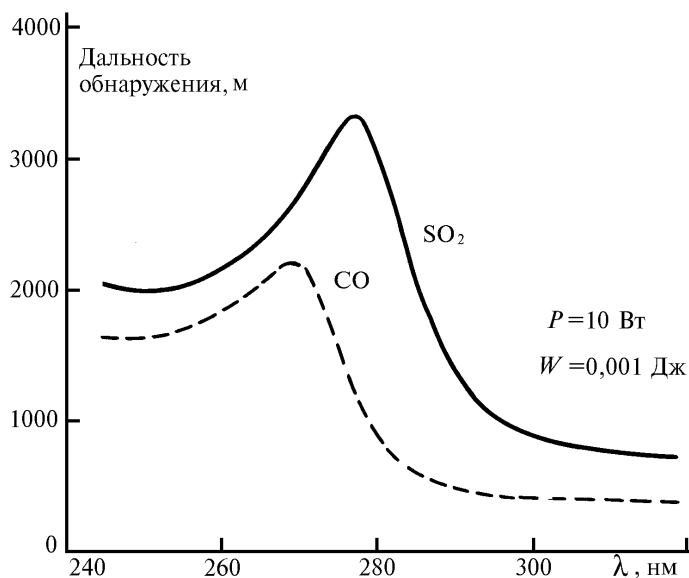


Рис. 6. Сравнение дальностей обнаружения загрязняющих компонентов, имеющих различные рамановские частотные сдвиги ($\Delta\nu_{\text{CO}} = 2145 \text{ см}^{-1}$; $\Delta\nu_{\text{SO}_2} = 1151 \text{ см}^{-1}$; $n = 100 \text{ млн}^{-1}$)

Проведенное исследование является некоторым этапом на пути освоения <солнечно-слепого> диапазона лазерным зондированием. Выполнение этой работы стало возможным, благодаря поддержке Специального фонда для выплаты стипендий и грантов талантливым молодым ученым. Коллектив авторов надеется на успешное продолжение работы в этом направлении.

1. Кауль Б. В. Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 2. С. 211–215.
2. Гущин Г. П., Виноградова Н. Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 238 с.
3. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
4. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 287 с.
5. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Оптика атмосферного аэрозоля. Современные проблемы оптики атмосферы. Т. 4. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 254 с.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
28 марта 1994 г.

Yu. F. Arshinov, S.M. Bobrovnikov, A.G. Popov, D.I. Shefontyuk, and V.K. Shumskii. **Raman-Lidar Detection Range for Contaminating Gaseous Species in the UV Solar Blind Region.**

In this paper we present analysis of a Raman lidar for detecting gaseous pollutions of the atmosphere in the UV spectral region.

It is shown in the paper that a strong spectral dependence of the detection range occurs in the solar blind region. It is also shown that optimal wavelengths of sounding radiation can be found in the UV region that are more efficient for use to detect air pollutions.