

С.И. Долгий, В.В. Зуев, С.В. Смирнов, С.Ф. Шубин

**ИК ЛАЗЕРНЫЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
«ТРАЛ-3» И «ТРАЛ-3М»**

Сообщается о модификациях лазерного газоанализатора дифференциального поглощения типа «ТРАЛ». Приводятся технические характеристики и описываются потенциальные возможности газоанализаторов. Представлен обширный список зондируемых газов, их минимально обнаружимые концентрации, определяемые с помощью этих устройств.

Известно, что средний ИК-диапазон спектра частот электромагнитных колебаний представляет значительный практический интерес о лазерном газоанализе атмосферы, поскольку в нем присутствуют полосы или линии поглощения практически всех малых газовых составляющих атмосферы (МГСА) [1, 2]. В этом же диапазоне имеются эффективные источники дискретно перестраиваемого по частоте когерентного излучения на основе СО- и СО₂-лазеров, снабженных параметрическими преобразователями частот (ППЧ) [3–5].

Ранее нами сообщалось [4–7] об успешных измерениях в реальной атмосфере в разных климатических зонах и в различных экологических ситуациях концентраций NH₃, O₃, C₂H₄, H₂O, СО и NO с помощью перестраиваемых непрерывных CWCO₂-лазеров с ППЧ. Измерения проводились на трассах длиной до 3 км с использованием зеркального отражателя и до 0,125 км при работе по топографическим мишеням (например, по стенам зданий).

В настоящее время в нашей лаборатории разработаны и находятся в степени доводки макеты лазерных газоанализаторов дифференциального поглощения (ЛГДП) «ТРАЛ-3» и «ТРАЛ-3М», предназначенные для дистанционных и локальных высокочувствительных измерений массовых концентраций широкого ряда приоритетных МГСА на горизонтальных и слабонаклонных трассах.

Принципиальные блок-схемы обоих ЛГДП практически совпадают (рис. 1). Однако в этих макетах в качестве источников излучения используются разные лазеры (рис. 2). Так, в первом макете «ТРАЛ-3» установлены непрерывные с продольным разрядом (CW) перестраиваемые СО- и СО₂-лазеры низкого давления с модуляцией добротности и с генераторами суммарных и разностных частот (ГСЧ и ГРЧ соответственно). Во втором макете «ТРАЛ-3М» — два импульсных перестраиваемых ТЕА СО₂-лазера с ГСЧ и ГРЧ, причем один из лазеров снабжен генератором второй гармоники (ГВГ).

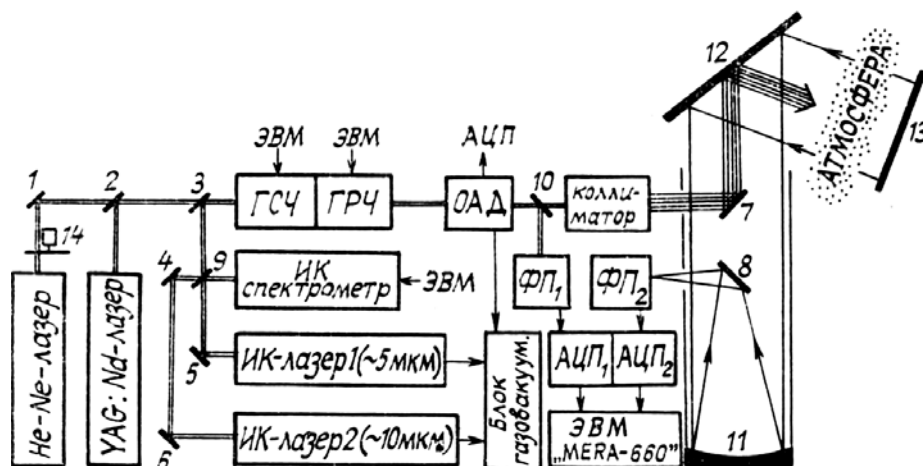


Рис. 1. Принципиальная блок-схема ЛГДП (1–8 — подвижные зеркала; 9, 10 — полупропускающие пластины; 11 — приемное зеркало диаметром 30 см; 12 — зеркало-сканатор; 13 — зеркальный отражатель, в случае «ТРАЛ-3М» возможен вариант с топографической мишенью; 14 — модулятор)

Имеющиеся у нас непрерывные СО- и СО₂-лазеры обладают узкой стабильной линией излучения с полушириной около $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Такая линия на 1–2 порядка уже линии поглощения зондируемого газа в среднем ИК-диапазоне при атмосферном давлении. Поэтому регистрируемые значения спектральной прозрачности зондируемого слоя атмосферы не искажаются аппаратной функцией лазерного источника [8]. Для средней мощности излучения СО-лазера 5–7 Вт и СО₂-лазера 2–3 Вт мож-

но получить пиковую мощность около 60 и 30 Вт соответственно, используя модуляцию добротности с частотой $10^2 - 10^3$ Гц. В этом случае реализуются длительности импульса генерации около 1–2 мкс. Эффективность преобразования по частоте таких лазеров в ГСЧ и ГРЧ может достигать тогда около 1%, и, следовательно, мощность зондируемого импульса составит приблизительно 0,6 Вт (без учета потерь в оптике). При таких значениях мощности измерения концентраций газов на длинных трассах до 2–3 км возможны только лишь с использованием зеркального отражателя. При этом, однако, такой мощности зондирующего излучения оказывается вполне достаточно, чтобы применять фотоприемники со средней чувствительностью (например, пироэлектрические приемники), если, конечно, осуществляется полный перехват излучения.

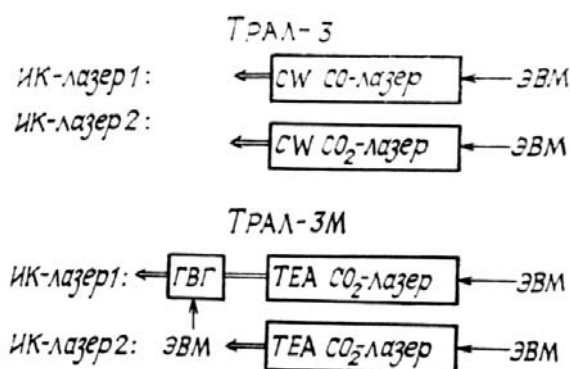


Рис. 2. Перестраиваемые ИК молекулярные лазеры для макетов «ТРАЛ-3» и «ТРАЛ-3М»

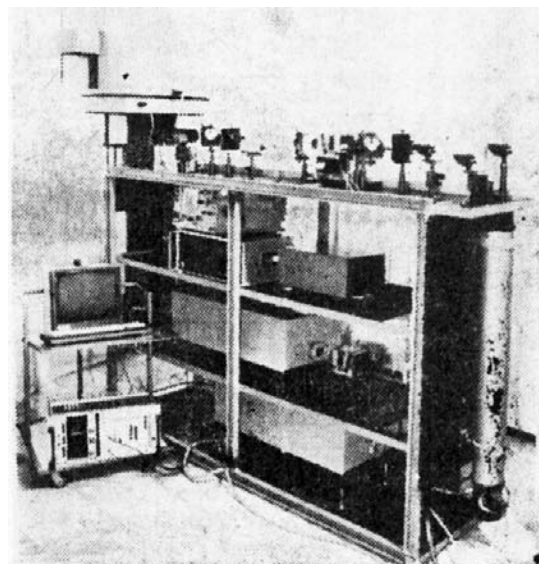


Рис. 3. Общий вид ЛГДП «ТРАЛ-3М»

Используемые в «ТРАЛ-3М» импульсные ТЕА CO_2 -лазеры с рабочим давлением смеси в резонаторе около 300 Торр имеют полуширину линии излучения около $3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Линию излучения можно сделать уже, снижая давление смеси, но тогда существенно уменьшается мощность. Пиковая мощность 100 нс импульса ТЕА CO_2 -лазера составляет 3–5 МВт. Эффективность преобразования частоты излучения этого лазера достигает для ГВГ более 10%, для ГСЧ и ГРЧ — более 1%. В этом случае мощность зондируемого импульса около 300–500 кВт для ГВГ и около 30–50 кВт для ГСЧ и ГРЧ оказывается достаточной, чтобы проводить измерения концентраций МГСА, регистрируя отраженное излучение от удаленной топографической мишени и используя высокочувствительные охлаждаемые фотоприемники на основе КРТ, InSb и InAs. При этом следует подчеркнуть, что регистрируемая в этом случае спектральная прозрачность атмосферного зондируемого слоя подлежит корректировке, поскольку она искажается из-за влияния конечной ширины линии лазерного излучения, которая к тому же уширяется примерно в $\sqrt{2}$ раз после каждого акта преобразования частоты и становится сравнимой с шириной линий поглощения большинства газов.

Опишем подробнее оптическую часть блок-схемы ЛГДП, представленной на рис. 1. Лазеры с ППЧ излучают длины волн в диапазонах: I—9,2–10,8 мкм (область основных гармоник CO_2 -лазера); II—4,6–5,4 мкм (вторых гармоник); III—3,1–3,6 мкм (третьих гармоник); IV—8,0–13,1 (область разностных частот между гармониками II и I диапазонов).

Следует подчеркнуть, что используемые CO_2 -лазеры (как непрерывные, так и импульсные) не являются отпаянными, что позволяет изменять изотопный состав газовой смеси в лазерных трубках. Кроме того, в импульсных ТЕА CO_2 -лазерах предусмотрена установка в резонатор нагреваемой кюветы с CO_2 , позволяющей одновременно переключать излучение на вторую секвенционную полосу и основную полосу в районе 4,3 мкм.

Излучение через коллиматор с помощью сканирующего зеркала направляется на топографический или зеркальный отражатель. Обратные сигналы регистрируются пироэлектрическим приемником либо охлаждаемым фотоприемником в зависимости от типа используемого отражателя. Контроль длины волны осуществляется с помощью ИК-спектрометра или панорамного анализатора спектра (ПАС). Наличие оптико-акустического детектора (ОАД) позволяет проводить калибровку ЛГДП, а также локальные измерения концентраций газов в пробах воздуха.

Излучение He—Ne-лазера с длиной волны 0,63 мкм используется для визуализации трассы и настройки оптической схемы. Длина волны 3,39 мкм этого лазера используется при измерении суммарной концентрации углеводородов.

Импульсный YAG: Nd-лазер с длиной волны ГВГ 0,53 мкм применяется для дальнометрирования трассы зондирования. Кроме того, длины волн 0,53 и 0,63 мкм используются для оценки массового содержания аэрозоля в атмосфере.

Таблица 1

Список газов и их минимально обнаружимых концентраций (МОК), определяемых при зондировании 1-км горизонтального слоя приземной атмосферы с помощью ЛГДП «ТРАЛ-3М» (on-line и off-line — в линии и вне линии поглощения зондируемого газа соответственно)

Раздел	Газ	Линии излучения и их комбинации		КДП, см ⁻¹ ·атм ⁻¹	МОК, ppb	ПДК, ppm
		on-line	off-line			
1	SF ₆	10P(16)	10P(10)	620,0	8(-2)	—
	NH ₃	9R(30)	9R(28)	75,03	1	—
	N ₂ H ₄	10P(32)	10P(34)	3,30	15	—
	C ₆ H ₆	9P(30)	9P(26)	1,60	31	—
	H ₂ O	10R(20)	10R(18)	0,001	165 ppm	—
	C ₂ H ₄	10P(14)	10P(12)	30,70	2	—
	O ₃	9P(14)	9P(22)	11,10	5	—
	C ₂ H ₅ SH	10R(26)	10P(20)	0,38	600	250
	C ₂ H ₃ Cl	10P(22)	9R(18)	8,75	20	14
	C ₂ HCl ₃	10P(20)	10R(20)	12,56	24	5
	C ₂ Cl ₄	10P(34)	10R(24)	4,80	60	18
	C ₂ H ₅ Cl	10R(16)	10P(20)	3,24	75	20
	C ₂ H ₄ Cl ₂	10P(20)	10R(16)	0,51	550	120
	C ₄ H ₅ Cl	10R(18)	9P(22)	9,05	45	12
	CF ₂ Cl ₂	10P(32)	10P(12)	35,62	6	2
	CFCl ₃	9R(22)	9P(18)	29,10	7	2
2	NO	2×10P(24)	2×10P(26)	1,98	41	—
	CO	2×9P(24)	2×9P(26)	26,59	4	—
	OCS	2×9P(30)	2×9P(14) ¹	113,9	1	—
	CO ₂	10R(30)+9R(14)	2×9P(40)	0,023	4 ppm	—
	N ₂ O	9R(40)+9R(18) ²	2×9R(40)	18,07	6	—
3	HCl	2×10P(26)+ +10P(20)	2×10P(26)+ +10P(14)	34,00	3	3,350
	NO ₂	2×10P(30)+ +9P(16)	2×10P(26)+ +9P(24)	4,00	25	1,064
	CH ₄	2×9P(10)+ +10R(18)	2×9R(16)+ +10P(32)	43,70	2	—
	H ₂ CO	2×10P(24)+ +10P(29) ³	2×10P(30)+ +10P(18)	23,10	4	0,408
4	SO ₂	2×9P(19) ³ — —10P(14)	2×9P(22)— —10P(16)	1,57	42	—
	PH ₃	2×9P(28)— —9R(34)	2×9P(34)— —9R(12)	20,40	6	0,719
	HNO ₃	2×10R(20)— —9P(10)	2×10P(26)— —10R(22)	9,42	11	1,252
	C ₂ H ₂	2×10P(36)— —9R(26)	2×10P(37) ³ — —9R(36)	3,99	3	—
	HCN	2×10P(38)— —9R(38)	2×10P(37) ³ — —9R(32)	4,50	22	0,272

¹Линия C¹³O₂¹⁸.

²Линия C¹²O₂¹⁸.

³Секвенционная полоса CO₂.

Характеристики обоих ЛГДП представлены ниже. Общий вид одного из них («ТРАЛ-3М») приведен на рис. 3. В табл. 1 и 2 приведены списки газов и их минимально обнаружимые концентрации

(МОК), которые могут быть определены с помощью ЛГДП «ТРАЛ-3» и «ТРАЛ-3М» при зондировании горизонтальной атмосферной трассы длиной 1 км до рефлектора, полагая минимальным уровнем погрешностей при регистрации оптических сигналов 1%. Газы сведены по разделам, соответствующим четырем спектральным диапазонам излучения лазеров с ППЧ. Первые два раздела являются общими для обоих ЛГДП, за исключением позиций 20 и 21 (СО₂ и N₂O), которые для «ТРАЛ-3» отсутствуют, поскольку их выполнение требует наличия двух СО₂-лазеров. Основные различия наблюдаются в разделах III и IV, где спектры излучения ГВГ СО₂-лазера и основных частот СО-лазера хотя и попадают в один спектральный диапазон, но, естественно, отличаются. Незначительное смещение спектров излучения этих источников приводит к тому, что с помощью «ТРАЛ-3М» можно зондировать SO₂ (№ 26, IV раздел, табл. 1), а для «ТРАЛ-3» такая возможность отсутствует. И наоборот, с помощью «ТРАЛ-3» можно зондировать HBr (табл. 2), а с помощью «ТРАЛ-3М» нет. Кроме того, чувствительность обнаружения обоих газов в этих разделах разная, поскольку линии излучения попадают в разные спектральные участки с различными коэффициентами дифференциального поглощения (КПД) в линии (on-line) и вне линии (offline) поглощения зондируемых газов.

Таблица 2

Список газов и их минимально обнаружимых концентраций (МОК), определяемых при зондировании 1-км горизонтального слоя приземной атмосферы с помощью ЛГДП «ТРАЛ-3» (on-line и off-line — в линии и вне линии поглощения зондируемого газа соответственно)

Раздел	Газ	Линии излучения и их комбинации		КДП, см ⁻¹ × × атм ⁻¹	МОК, ppb	ПДК, ppm
		on-line	off-line			
3	1 HCL	P(17)+10P(32)	P(15)+10R(16)	34,10	3	3,350
	2 HBr	P(16)+10P(24)	P(15)+10P(30)	5,35	200	0,604
	3 NO ₂	P(19)+9P(20)	P(21)+9P(26)	3,66	300	1,064
	4 CH ₄	P(21)+9P(16)	P(19)+9P(24)	5,94	21	—
	5 H ₂ CO	P(17)+10R(14)	P(18)+9P(18)	20,95	6	0,408
4	6 HNO ₃	P(16)—10R(20)	P(15)—10P(12)	9,42	110	1,252
	7 PH ₃	P(16)—10P(28)	P(16)—10P(26)	2,13	1 ppm	0,719
	8 C ₂ H ₂	P(21)—9R(30)	P(18)—10R(18)	43,99	3	—
	9 HCN	P(9)—9R(16)	P(14)—10R(22)	10,43	110	0,272

Примечание. В этой таблице разделы 1 и 2 те же, что и в табл. 1, исключая пункты 20 и 21. Измерения концентраций СО₂ и N₂O на комбинированных частотах излучений СО- и СО₂-лазеров являются невыгодными, ввиду отсутствия в этой спектральной области точного совпадения линий излучения с линиями поглощения этих газов.

Поиск информативных линий излучения СО- и СО₂-лазеров и их комбинационных частот для разделов II, III и IV осуществляется на основе численных расчетов с использованием атласа спектральных линий атмосферных газов GEISA [9] по методике [10, 11]. Данные раздела I приведены по известным источникам [1, 2, 12].

Передачик

	ТРАЛ-3	ТРАЛ-3М
Максимальная мощность зондируемого импульса на длинах волн (мкм)		
3,1—3,6 (ГСЧ)	менее 0,6 Вт	50 кВт
4,6—5,4 (ГВГ)	менее 0,6 Вт	500 кВт
8,0—13,1 (ГРЧ)	менее 0,6 Вт	50 кВт
9,2—10,8	30—60 Вт	5 МВт
Длительность импульса	1—2 мкс	100 нс
Частота следования импульсов	100—150 Гц	1—5 Гц

Приемник

Диаметр телескопа	0,3 м
Фокусное расстояние телескопа	1 м
Поле зрения телескопа	около 5 мрад
Пороговая чувствительность	
охлаждаемого фотоприемника	10 ⁻⁹ см Гц ^{1/2} · Вт ⁻¹
пироэлектрического приемника	10 ⁻⁵ В · Вт ⁻¹
оптико-акустического детектора около	10 ⁻⁹ см ⁻¹ · Вт
Концентрационная чувствительность	от единиц ppb до десятков ppm в зависимости от типа газа

Система регистрации и обработки данных:

Аналого-цифровой преобразователь	
число измерительных каналов	4
частота квантования	20 МГц
Обработка данных	миниЭВМ

Дальность и направление зондирования

Длина трассы	около 2 км	около 4 км
Угол места	от -10° до	$+60^\circ$
Азимут	360°	
Питание	380/220 В	(50 Гц)
Потребляемая мощность	около 3,5 кВт	

Габаритные размеры:

Блок оптико-механический	2,5×0,6×2,0 м
Блок электропитания	1,0×1,0×1,5 м
Блок системы регистрации и обработки данных и управления	1,0×1,0×1,5 м
Блок газовакуумный	0,5×1,0×1,0 м
Общая масса	около 650 кг

В заключение следует отметить, что приведенный список зондируемых газов является далеко не полным, поскольку отсутствуют достоверные данные о линиях и полосах поглощения многих других газов. «ТРАЛ-3М», конечно, выигрывает по сравнению с «ТРАЛ-3» и по числу зондируемых газов, и по возможности более широкого выбора трасс зондирования, включая возможность квазипространственного разрешения с использованием топографических мишеней, удаленных на разное расстояние. Однако «ТРАЛ-3», в котором используются непрерывные лазеры, неохлаждаемые фотоприемники, является более помехозащищенным, надежным и дешевым устройством.

Конструкции обоих ЛГДП, их массогабаритные размеры и параметры энергопотребления специально рассчитаны на возможность их установки в фургоне автомобиля.

Авторы выражают благодарность О.В. Харченко за помощь в выполнении численных расчетов на ЭВМ

1. Mc Clatchey R.A., Benedict W.S., Clough S.A. et al. Tech. Rep. AFCRL-TR-73-0096, ERP 434. 1973.
2. Rothman L.S., Gamache R.R., Goldman A. et al. //Appl. Optics. 1987. № 26. P. 4058.
3. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Зуев В.В. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 51–56.
4. Долгий С.П., Кудинова Л.П., Мицель А.А. и др. //Системы автоматизации экспериментов по оптике атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1980. С. 67–78.
5. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Грибенюков А.И. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 20–26.
6. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности //Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Ипполитов И.И. и др. Новосибирск: Наука, 1987. С. 107–122.
7. Андреев Ю.М., Васин И.Л., Гейко П.П. и др. //Результаты комплексных экспериментов «Вертикаль-86» и «Вертикаль-87». Томск: ТНЦ СО АН СССР. 1989. С. 77–94.
8. Зуев В.В., Романовский О.А. К учету систематических погрешностей в лидарном методе дифференциального поглощения. М., 1987. С. 44. Деп. а ВИНТИ 25.06.87. № 4675-B87.
9. Husson N., Chedin A., Scott N. A. et al. Ann. Geophys. 1986. Fass. 2. Ser. A.
10. Андреев Ю.М., Зуев В.В., Романовский О.А. Автоматизированная система поиска оптимальных длин волн для лазерного газоанализа методом дифференциального поглощения. Части I и II. М., 1988. 62 с. Деп. в ВИНТИ 19.04.88. № 4059-B88.
11. Зуев В.В., Романовский О.А. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 12. С. 29–32.
12. Mayer A., Comera T., Charpentier H., Taussand C. //Appl. Optics. 1978. V. 17. № 3. P. 391–393.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
4 февраля 1991 г.

S.I. Dolgii, V.V. Zuev, S.V. Smirnov, S.F. Shubin. «TRAL-3» and «TRAL-3M» Models of IR Dial Gas Analyzers.

Modified versions of the dial gas analyzer TRAL are described. Technical characteristics and potentials of the gas analyzers are discussed. A fairly long list of the probed gases and their minimum concentrations detectable by the proposed systems are presented.