

Исследование корреляционного метода измерения содержания N_2O в слоях атмосферы со спутника

С.А. Шишигин, С.Ф. Баландин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 3.12.2013 г.

Проведен анализ метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания закиси азота в атмосфере в спектральном интервале $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$. Рассмотрено влияние давления в корреляционной кювете и ее длины на результаты измерений. Исследовано влияние содержания изучаемого газа в горизонтальных слоях атмосферы и излучения воздуха на погрешность измерений содержания закиси азота в столбе атмосферы. Оценена возможность применения метода корреляции газовых светофильтров для определения содержания закиси азота в приземном слое атмосферы с аэрокосмической платформы.

Ключевые слова: корреляционный радиометр, закись азота, атмосфера, излучение; correlation radiometer, nitrous oxide, atmosphere, radiation.

Введение

Начиная с 70-х гг. XX в. определение содержания N_2O в атмосфере проводилось с использованием спектрофотометров, установленных на аэростатах и самолетах [1–3], на основе измерений солнечного спектра на различных высотах [4, 5].

В зависимости от разрешения спектральная аппаратура относится к следующим классам: сверхвысокому $10^{-3}\text{--}10^{-2}\text{ см}^{-1}$; высокому $10^{-2}\text{--}10^{-1}\text{ см}^{-1}$ и среднему $0,1\text{--}1\text{ см}^{-1}$ [6]. Как показано в [6], для определения малых газовых составляющих атмосферы требуется аппаратура высокого и сверхвысокого спектрального разрешения.

Спутниковое зондирование закиси азота в атмосфере проводилось корреляционным газоанализатором SAMS (1978–1982 гг.) со спутника NIMBUS-7 на высотах от 20 до 100 км путем регистрации излучения атмосферы по касательным трассам в области $5,3\text{ мкм}$ с использованием ячейки с модуляцией давления в ней частотой $20\text{--}50\text{ Гц}$; корреляционным радиометром ISAMS (1991 г.) со спутника UARS (улучшенной версии SAMS) по собственному излучению лимба Земли в спектральной области $7,7\text{--}7,94\text{ мкм}$, а также российским спутником «Метеор-М» (2009 г.), имеющим на своем борту спектрометр ИКСФ-2 со спектральным разрешением $0,5\text{ см}^{-1}$, пространственным разрешением $\sim 35\text{ км}$ при времени получения спектра $\sim 0,6\text{ с}$ [7, 8].

На канадском спутнике SCISAT проводились исследования газового состава прибором ACE-FTS [9].

Впервые осуществлялись измерения прозрачности атмосферы на касательных трассах с высоким спектральным разрешением $0,02\text{ см}^{-1}$ в области $2,2\text{--}13\text{ мкм}$. Спектральные микроволновые измерения излучения горизонта Земли с помощью спектрометра MLS позволяют определить профили N_2O ($10\text{--}60\text{ км}$) с погрешностью $5\text{--}10\%$ [10]. Оптические измерения спутниковыми приборами MODIS, MOPITT и OMI используются для определения содержания газовых примесей атмосферы (CO , NO_2 , SO_2 , CH_2O , O_3 , H_2O). Надирные измерения уходящего теплового излучения при среднем спектральном разрешении малоинформативны по отношению к вертикальным профилям содержания парниковых газов в атмосфере [11, 12].

Основной недостаток всей используемой до настоящего времени аппаратуры для дистанционных измерений – неудовлетворительное разрешение функции пропускания N_2O , что создает дополнительные погрешности при восстановлении полей концентраций. С целью устранения этого недостатка рассматривается методика пассивного корреляционного зондирования N_2O , преимущество которой по сравнению с другими методами газоанализа заключается в сверхвысоком спектральном разрешении частотного спектра фильтра в виде кюветы с исследуемым газом.

В работе [13] выбран оптимальный спектральный диапазон и определен уровень помех и суммарного информационного сигнала от всей толщаты атмосферы. В настоящей статье приведены результаты исследования влияния вертикальной неоднородности атмосферы на выходной сигнал спутникового корреляционного радиометра.

* Сергей Алексеевич Шишигин (ssa@iaao.ru); Сергей Флавинович Баландин (bal@iaao.ru).

Основные параметры модели атмосферы и корреляционного радиометра

Рассмотрена модель атмосферы, разделенной на однородные горизонтальные слои толщиной 1 и 2 км. В табл. 1 приведены средние значения температуры T , давления P , концентрации N воздуха и процентное содержание молекул O_2 , N_2 , CH_4 , CO_2 , CO , N_2O , O_3 , H_2O в выбранных слоях атмосферы.

В работе [13] показано, что участок спектра уходящего излучения $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$ для измерения содержания закиси азота в столбе атмосферы пассивным корреляционным методом является наиболее перспективным.

На функцию пропускания атмосферными газами в данном участке спектра оказывают основное влияние метан (CH_4), пары воды (H_2O). Среднее значение функции пропускания излучения атмосферой в спектральном участке полосы поглощения закиси азота $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$ составляет около 0,81.

С помощью соотношения для выходного сигнала радиометра (аппаратурной функции), полученного в работе [14], рассчитана зависимость сигнала корреляционного радиометра Γ при измерении содержания N_2O в рассмотренной модели атмосферы от количества закиси азота в кювете LP (L — длина кюветы, P — давление закиси азота) при температуре 296 К в спектральном диапазоне $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$ (рис. 1).

Кроме того, на рис. 1 приведена зависимость среднего значения функции пропускания T_k данных кювет от количества N_2O в них. Увеличение содержания закиси азота в кювете приводит к ослаблению регистрируемого излучения.

Как видно из рис. 1, величина выходного сигнала радиометра Γ вначале резко возрастает, а затем темп роста сигнала уменьшается с увеличением содержания закиси азота в кювете. Область величин $LP \sim 0,01\text{--}0,02\text{ атм} \cdot \text{м}$, в которой происходит изменение темпа роста выходного сигнала радиометра при измерении содержания исследуемого газа в атмосфере, считаем оптимальной для данного спектрального участка. При приемлемом ослаблении регистрируемого потока излучения закисью азота в кювете наблюдается высокая чувствительность к изменению содержания N_2O не только в кювете, но и в атмосфере.

В табл. 2 приведены изменения выходного сигнала радиометра Γ в зависимости от повышения температуры газа в корреляционной кювете на 1 К при различных его параметрах: P — давление N_2O , L — длина кюветы, Q_k — температура. Колебания температуры корреляционной кюветы в пределах 1 К приводят к изменению выходного сигнала радиометра менее 0,2% в широком диапазоне изменения давления (0,05–2 атм), температуры (250–300 К) закиси азота в кювете. Флуктуации температуры газа в корреляционной кювете слабо влияют на уровень выходного сигнала, что позволяет проводить дальнейшие расчеты при комнатной температуре 296 К.

Таблица 1

Параметры модели атмосферы

H , км	T , К	P , атм	$N \cdot 10^{-19}$, см ⁻³	O_2 , %	N_2 , %	CH_4 , 10 ⁻⁴ %	CO_2 , 10 ⁻⁴ %	CO , 10 ⁻⁴ %	N_2O , 10 ⁻⁴ %	O_3 , 10 ⁻⁴ %	H_2O , 10 ⁻⁴ %
0	288	1	2,550	21	78	1,6	370	0,250	0,420	0,027	7730
1	282	0,891	2,300	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,026	6800
2	275	0,787	2,100	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	5000
3	269	0,694	1,900	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
4	263	0,611	1,700	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,027	2600
5	256	0,535	1,530	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,027	1800
6	249	0,467	1,370	21	78	1,6	370	0,200	0,400	0,029	1000
7	243	0,407	1,230	21	78	1,6	370	0,180	0,400	0,033	500
8	236	0,353	1,100	21	78	1,6	370	0,150	0,400	0,041	240
9	230	0,305	0,970	21	78	1,6	370	0,120	0,400	0,052	50
10	223	0,262	0,860	21	78	1,5	370	0,100	0,400	0,070	10
12	217	0,192	0,650	21	78	1,45	370	0,080	0,400	0,123	8
14	217	0,141	0,470	21	78	1,40	370	0,060	0,400	0,213	7
16	217	0,103	0,350	21	78	1,32	370	0,050	0,400	0,857	6
18	217	0,075	0,250	21	78	1,25	370	0,008	0,400	2,000	4,50
20	217	0,055	0,180	21	78	1,20	370	0,005	0,400	3,333	4,00
22	219	0,040	0,140	21	78	1,10	370	0,005	0,350	4,286	4,20
24	221	0,029	0,100	21	78	1,00	370	0,005	0,300	5,000	4,40
26	223	0,022	0,070	21	78	0,90	370	0,005	0,200	5,714	4,50
28	225	0,016	0,050	21	78	0,80	370	0,005	0,150	6,000	4,60
30	227	0,012	0,045	21	78	0,70	370	0,005	0,100	4,444	4,70
32	229	0,009	0,040	21	78	0,65	370	0,007	0,080	3,750	4,80
34	235	0,008	0,035	21	78	0,60	370	0,008	0,070	3,714	5,00
36	245	0,007	0,030	21	78	0,58	370	0,010	0,060	3,333	6,00
38	255	0,006	0,024	21	78	0,53	370	0,020	0,050	2,917	6,50
40	265	0,003	0,012	21	78	0,50	370	0,030	0,040	3,333	7,00

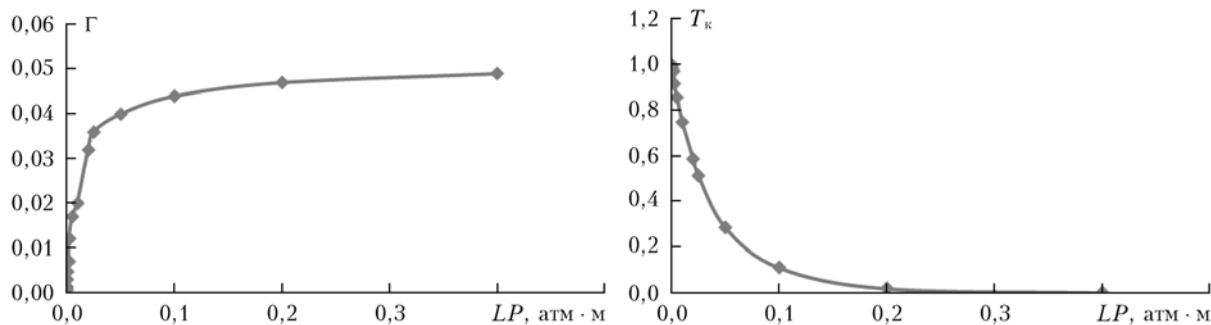


Рис. 1. Зависимость аппаратурной функции Γ и среднего значения функции пропускания кюветы T_k с N_2O от среднего значения произведения длины кюветы на величину давления закиси азота в ней

Таблица 2

Зависимость сигнала радиометра от параметров корреляционной кюветы

Q_k, K	$P, атм$					
	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2
	$L, м$					
	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005
250	$4,58 \cdot 10^{-5}$	$4,63 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-5}$	$4,43 \cdot 10^{-5}$	$3,99 \cdot 10^{-5}$	$2,98 \cdot 10^{-5}$
260	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-5}$	$4,18 \cdot 10^{-5}$	$2,99 \cdot 10^{-5}$
270	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$4,58 \cdot 10^{-5}$	$4,63 \cdot 10^{-5}$	$4,74 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	$3,00 \cdot 10^{-5}$
280	$4,38 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-5}$	$4,66 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-5}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-5}$
290	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$4,51 \cdot 10^{-5}$	$4,67 \cdot 10^{-5}$	$4,92 \cdot 10^{-5}$	$4,51 \cdot 10^{-5}$	$2,99 \cdot 10^{-5}$
300	$4,29 \cdot 10^{-5}$	$4,50 \cdot 10^{-5}$	$4,68 \cdot 10^{-5}$	$4,97 \cdot 10^{-5}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$	$3,00 \cdot 10^{-5}$

На основании выполненных расчетов выбрано оптимальное содержание закиси азота в кюветах 0,01–0,02 атм · м при температуре 296 К для спектрального участка 2530–2590 $см^{-1}$, которое использовалось при рассмотрении влияния вертикальной неоднородности атмосферы на выходной сигнал корреляционного радиометра с кюветами при разных давлениях, но постоянном оптимальном содержании N_2O в них.

Влияние изменения температуры поверхности Земли, слоев атмосферы на выходной сигнал радиометра с разными корреляционными кюветами

Среднее значение спектральной энергетической яркости теплового излучения поверхности Земли в частотном участке 2530–2590 $см^{-1}$ при температуре 290 К для коэффициента черноты Земли 0,95 составляет $\sim 5,746 \cdot 10^{-8}$ Вт/($см^2 \cdot ср \cdot см^{-1}$), а покидает атмосферу в отсутствие облаков излучение поверхности Земли и атмосферы $\sim 5,136 \cdot 10^{-8}$ Вт/($см^2 \cdot ср \cdot см^{-1}$) без учета солнечного излучения (ночное время).

Согласно проведенным расчетам выходной сигнал радиометра с корреляционной кюветой при давлении закиси азота ~ 1 атм имеет максимальную чувствительность к изменению температуры поверхности Земли и уменьшается с понижением давления в кювете и повышением температуры поверхности

Земли. Изменения аппаратурной функции при измерении содержания N_2O в столбе атмосферы корреляционным радиометром в зависимости от увеличения температуры поверхности Земли на 1 К в диапазоне 290–310 К (т.е. от увеличения мощности теплового излучения более 4%) не превышают 1%. Излучение воздушной среды оказывает существенное влияние на информационный сигнал корреляционного радиометра. Отсутствие излучения слоев атмосферы в расчетах уходящего излучения в спектральном диапазоне 2530–2590 $см^{-1}$ увеличивает выходной сигнал корреляционного радиометра по сравнению с рассматриваемыми нами сигналами примерно на 20%.

Спектральная энергетическая яркость теплового излучения всех слоев атмосферы в спектральных участках 2530–2590 $см^{-1}$ составляет $\sim 42 \times 10^{-10}$ Вт/($см^2 \cdot ср \cdot см^{-1}$), а уходит в космос излучение $\sim 31 \cdot 10^{-10}$ Вт/($см^2 \cdot ср \cdot см^{-1}$). На рис. 2 приведены усредненная по рассматриваемому спектру спектральная энергетическая яркость теплового излучения слоя атмосферы и спектральная плотность уходящего из атмосферы излучения данного слоя в зависимости от расстояния его нахождения от поверхности Земли, а также средние значения функции пропускания излучения в спектральном участке 2530–2590 $см^{-1}$ слоев рассматриваемой модели атмосферы.

Мощность излучения прозрачной воздушной среды имеет максимальное значение на линиях поглощения газов и приводит к снижению выходного сигнала корреляционного радиометра.

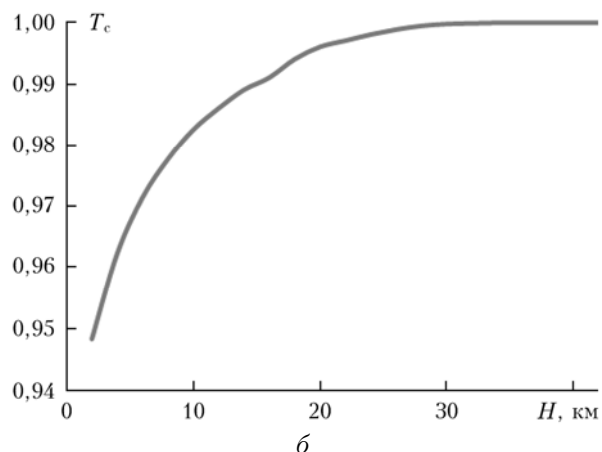
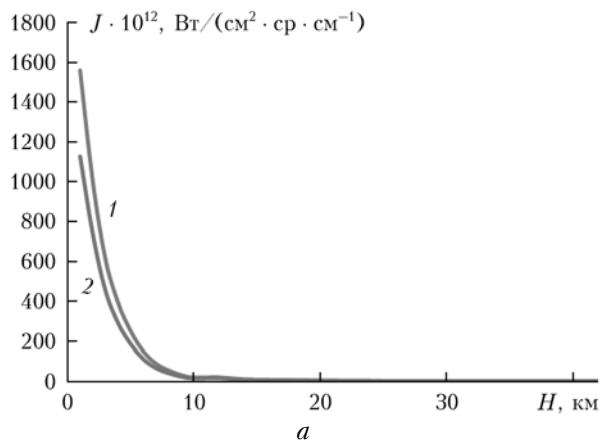


Рис. 2. Средние в участке $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$ значения спектральной энергетической яркости излучения J слоя атмосферы (кривая 1) и средние значения спектральной плотности уходящего из атмосферы излучения данного слоя (2) в зависимости от расстояния до поверхности Земли (а); средние в спектральном участке $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$ значения функции пропускания T_c слоев атмосферы (б)

На рис. 3 показаны изменения аппаратурной функции $\Delta\Gamma = \Gamma - \Gamma_0$ с уменьшением температуры слоя на 2 К при давлениях N_2O в корреляционной

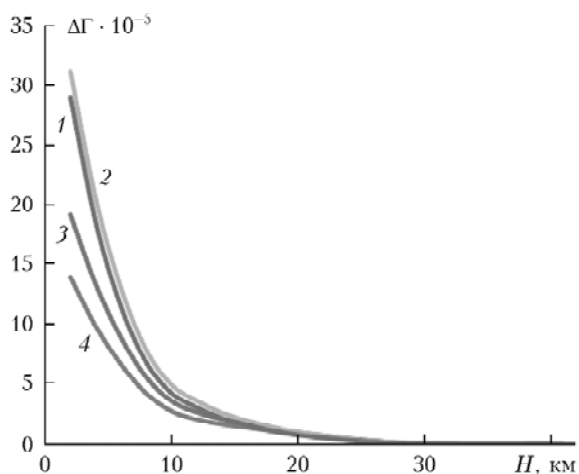


Рис. 3. Зависимость изменения аппаратурной функции радиометра со спутника при изменении температуры 2-км слоя атмосферы на 2 К и его расстояния от поверхности Земли

кювете 0,05 (4); 0,1 (3); 0,5 (1) и 1 атм (2), но постоянной его массе в зависимости от высоты в спектральном диапазоне работы радиометра $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$. Изменение температуры слоя атмосферы на 2 К приводит к увеличению аппаратурной функции, и эти изменения возрастают с ростом давления в корреляционной кювете до $\sim 0,5$ атм, а при 1 атм наблюдается снижение изменений выходного сигнала корреляционного радиометра.

Зависимость погрешности показаний радиометра от изменений параметров атмосферы

Наличие фонового аэрозоля в чистой атмосфере оказывает слабое влияние на выходной сигнал корреляционного радиометра. Учет фоновой модели спектрального поведения коэффициента оптического ослабления [15] показывает, что наличие фонового аэрозоля в атмосфере приводит к изменению выходного сигнала радиометра менее 0,2%.

Проведенные расчеты аппаратурной функции показали, что изменение объемной концентрации паров воды и метана в рассматриваемой модели распределения содержания газов в атмосфере в 2 раза приводит к изменению выходного сигнала радиометра с корреляционными кюветами с давлением закиси азота от 0,1 до 1 атм при измерении содержания N_2O во всей толще атмосферы не более 0,3%.

На рис. 4 показано изменение аппаратурной функции радиометра с кюветами при давлениях N_2O 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 атм с увеличением в слое воздуха толщиной 2 км содержания N_2O на 1% от общего содержания его в атмосфере в зависимости от расстояния нахождения слоя до поверхности Земли. Наблюдаются неоднородные изменения $\Delta\Gamma$ с увеличением содержания массы исследуемого газа в приземных слоях атмосферы. Рост прозрачности воздуха с увеличением расстояния от поверхности Земли приводит к наблюдаемой высотной зависимости изменения информационного сигнала радиометра от содержания исследуемого газа в атмосфере.

Увеличение массы исследуемого газа в атмосферном слое с ростом высоты приводит вначале к увеличению изменения аппаратурной функции $\Delta\Gamma$ до высоты $\sim 12\text{--}16$ км, а затем к ее снижению. Определение области изменения содержания исследуемого газа в воздухе необходимо для корректной интерпретации результатов изменений содержания N_2O во всей толще атмосферы. Отклонение концентрации исследуемого газа от стандартного распределения его в атмосфере [16] в зависимости от расстояния до поверхности Земли неодинаково проявляется в изменении выходных сигналов радиометра $\Delta\Gamma$, измеряющего содержание газа во всей толще атмосферы с корреляционными кюветами при давлениях N_2O 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1 атм. Одновременное измерение содержания N_2O в безоблачной атмосфере в спектральном участке $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$ радиометром с набором корреляционных кювет с закисью азота при

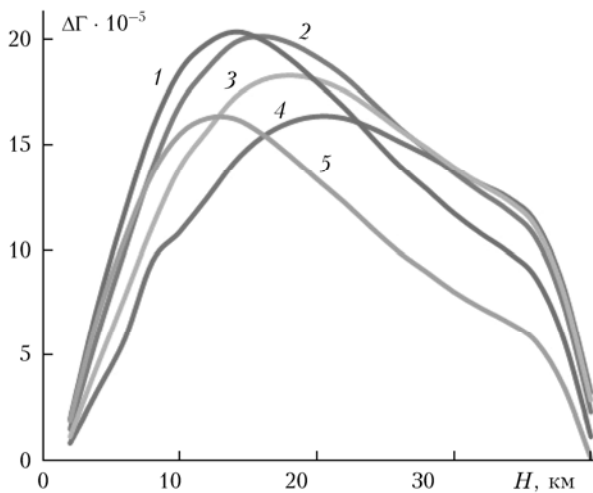


Рис. 4. Изменение аппаратурной функции $\Delta\Gamma$ радиометра с кюветами с N_2O при давлении 0,05 (4); 0,1 (3); 0,2 (2); 0,5 (1); 1 атм (5) в зависимости от увеличения закиси азота слоя атмосферы на 1% от общего его содержания и расстояния от поверхности Земли

разных давлениях позволяет контролировать содержание N_2O у поверхности Земли по соотношению показаний радиометров. При наличии облачности измерения содержания N_2O корреляционным радиометром над облаком и между облаками также позволяют получать данные о количестве исследуемого газа в приземном слое.

На рис. 5 приведены отношения показаний радиометра $\Delta\Gamma_{0,5}/\Delta\Gamma_1$; $\Delta\Gamma_{0,1}/\Delta\Gamma_1$; $\Delta\Gamma_{0,05}/\Delta\Gamma_1$; $\Delta\Gamma_{0,1}/\Delta\Gamma_{0,5}$; $\Delta\Gamma_{0,05}/\Delta\Gamma_{0,5}$; $\Delta\Gamma_{0,05}/\Delta\Gamma_{0,1}$ с корреляционными кюветами при давлении закиси азота 0,05; 0,1; 0,5; 1 атм (индексы при $\Delta\Gamma$) в зависимости от увеличения закиси азота в одном слое на 1% от общего его содержания в атмосфере и высоты нахождения данного слоя для спектрального диапазона $2530-2590\text{ см}^{-1}$.

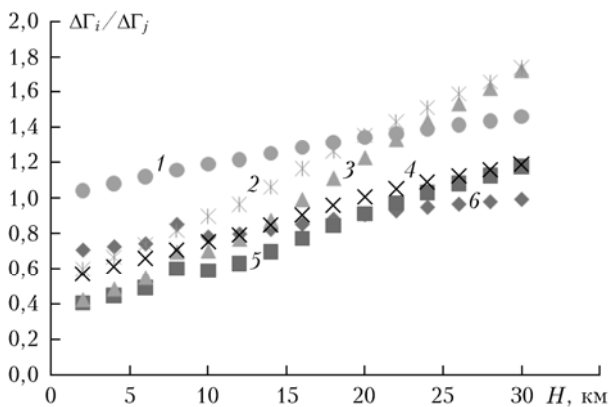


Рис. 5. Отношение выходных сигналов $\Delta\Gamma$ корреляционного радиометра с кюветами при давлении закиси азота 0,05; 0,1; 0,5; 1 атм в зависимости от увеличения содержания N_2O в одном слое на 1% от общего его содержания в атмосфере и высоты нахождения данного слоя $\Delta\Gamma_{0,5}/\Delta\Gamma_1$ (1); $\Delta\Gamma_{0,1}/\Delta\Gamma_1$ (2); $\Delta\Gamma_{0,05}/\Delta\Gamma_1$ (3); $\Delta\Gamma_{0,1}/\Delta\Gamma_{0,5}$ (4); $\Delta\Gamma_{0,05}/\Delta\Gamma_{0,5}$ (5); $\Delta\Gamma_{0,05}/\Delta\Gamma_{0,1}$ (6)

Наблюдается значительная зависимость отношения реакции выходных сигналов радиометров на изменение содержания N_2O в слоях атмосферы, что позволяет однозначно определить слой атмосферы, подверженный изменению концентрации закиси азота, и на основании этого найти истинное содержание данного газа во всей толще атмосферы.

Изменение аппаратурной функции $\Delta\Gamma$ радиометра с корреляционными кюветами, в которых исследуемый газ находится при разных давлениях, можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \Delta\Gamma_1 = k_{11}m_1 + k_{12}m_2 + k_{13}m_3 + \dots + k_{1n}m_n, \\ \Delta\Gamma_2 = k_{21}m_1 + k_{22}m_2 + k_{23}m_3 + \dots + k_{2n}m_n, \\ \dots, \\ \Delta\Gamma_i = k_{i1}m_1 + k_{i2}m_2 + k_{i3}m_3 + \dots + k_{in}m_n, \end{cases} \quad (1)$$

где i — число корреляционных кювет с исследуемым газом при разных давлениях и размерах; m_n — процентное изменение закиси азота в слое n ; k_{in} — коэффициенты, характеризующие чувствительность радиометра с i -й корреляционной кюветой к изменению N_2O в n -м слое атмосферы. Рис. 4 демонстрирует соотношение данных коэффициентов в зависимости от высоты расположения слоя от поверхности Земли. Обработка результатов одновременных измерений содержания газа с аэрокосмической платформы корреляционными радиометрами в разных спектральных участках полосы поглощения исследуемого газа и набором корреляционных кювет с помощью системы уравнений (1) относительно массовой доли возрастания измеряемого газа в слоях воздуха позволяет оперативно определить изменение вертикального распределения газа при перемещении спутника.

Требования к параметрам и количеству корреляционных кювет, необходимым для обработки результатов измерений содержания N_2O в столбе атмосферы корреляционным радиометром с минимальным набором кювет, и алгоритмы решения системы уравнений (1) будут рассмотрены в следующей публикации.

Заключение

Проведен анализ метода корреляции газовых светофильтров при измерении содержания закиси азота в атмосфере со спутника в спектральном интервале $2530-2590\text{ см}^{-1}$. Исследовано влияние концентрации изучаемого газа в горизонтальных слоях атмосферы и его излучения на чувствительность измерений N_2O . Рассмотрена возможность применения метода корреляции газовых светофильтров при определении содержания N_2O в приземном слое атмосферы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке оптоэлектронного прибора для оперативного мониторинга содержания N_2O в атмосфере, а также в качестве методики для обработки спектров, полученных при помощи современных сенсоров, установленных на спутниках.

1. Goldman A. Abundance of N₂O in the atmosphere between 4.5 and 13.5 km // J. Opt. Soc. Amer. 1970. V. 60, N 11. P. 1466–1468.
2. Goldman A. Balloon-borne infrared measurements of the vertical distribution of N₂O in the atmosphere // J. Opt. Soc. Amer. 1973. V. 63, N 7. P. 843–845.
3. Zander R. High resolution infrared solar observations by balloon // Infrared Phys. 1976. V. 16, N 3. P. 125–127.
4. Кшевцевская М.А., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. Измерения общего содержания закиси азота вблизи Санкт-Петербурга // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 75–79.
5. Грибанов К.Г., Захаров В.И., Береснев С.А., Рокотян Н.В., Поддубный В.А., Имасу Р., Чистяков П.А., Скорик Г.Г., Васин В.В. Зондирование Н₂О/Н₂О в атмосфере Урала методом наземных измерений ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 2. С. 124–127.
6. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 192 с.
7. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятков А.В., Мащукский Ю.П., Никулин А.Г., Романовский А.С., Горбунов Г.Г., Городецкий А.К., Воронкевич А.В. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Институт космических исследований РАН, 2006. Т. 3, № 1. С. 224–230.
8. Шкелёв Е.И., Кисляков А.Г., Савельев Д.В., Вакс В.Л. Вариации оптической толщины атмосферы в линиях вращательных спектров О₃ и N₂O // Вестн. Новгород. гос. ун-та. Радиофиз. 2010. № 2. С. 66–74.
9. Bernath P.F., McElroy C.T., Abrams M.C., Boone C.D., Butler M., Camy-Peyret C., Carleer M., Clerbaux C., Coheur P.-F., Colin R., DeCola P., De Mazière M., Drummond J.R., Dufour D., Evans W.F.J., Fast H., Fussen D., Gilbert K., Jennings D.E., Llewellyn E.J., Lowe R.P., Mahieu E., McConnell J.C., McHugh M., McLeod S.D., Michaud R., Midwinter C., Nassar R.P.R., Nichitiu F., Nowlan C., Rinsland C.P., Rochon Y.J., Rowlands N., Semeniuk K., Simon P., Skelton R., Sloan J.J., Soucy M.-A., Strong K., Tremblay P., Turnbull D., Walker K.A., Walkty I., Wardle D.A., Wehrle V., Zander R., Zou J. Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L15S01. DOI: 10.1029/2005GL022386.
10. URL: <http://uars.gsfc.nasa.gov>
11. Ситнов С.А. Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 г. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 572–581.
12. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы (обзор) // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1989. Т. 25, № 5. С. 451–472.
13. Баландин С.Ф., Шишигин С.А. Основные параметры корреляционного ИК-радиометра для измерения содержания закиси азота в атмосфере со спутника // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 256–260.
14. Баландин С.Ф., Старновский С.А., Шишигин С.А. Анализ возможного применения метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в атмосфере со спутника // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 10. С. 897–901.
15. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 280 с.
16. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 320 с.

S.A. Shishigin, S.F. Balandin. Study of the correlation technique for measurements of N₂O content in atmospheric layers from a satellite.

The analysis of the gas filter correlation technique for measurements of the nitrous oxide content in the atmosphere in the 2530–2590 cm⁻¹ spectral region has been carried out. The influence of the gas pressure in the correlation cell and the cell length on the observed results has been discussed. The influence of the N₂O concentration in atmospheric layers and emissivity of the atmosphere on the N₂O measurement error in the atmospheric column has been investigated. The feasibility of the gas filter correlation technique for measurements of the nitrous oxide content in the atmospheric boundary layer from aerospace platform has been examined.