

Основные параметры корреляционного ИК-радиометра для измерения содержания закиси азота в атмосфере со спутника

С.Ф. Баландин, С.А. Шишигин*

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

Поступила в редакцию 14.07.2010 г.

Определен спектральный диапазон ИК-излучения $2530\text{--}2590\text{ см}^{-1}$ для измерения содержания N_2O в атмосфере со спутника корреляционным методом, проведены расчеты оптимальных параметров корреляционной кюветы радиометра. Исследовано влияние на информационный сигнал радиометра изменения содержания газов в атмосфере (H_2O , CO , O_3 , N_2O , CH_4), температуры воздуха и подстилающей поверхности Земли.

Ключевые слова: закись азота, атмосфера, спутник, метод, корреляция, спектроскопия; nitrous oxide, atmosphere, satellite, method, correlation, spectroscopy.

Введение

В атмосфере увеличивается содержание долгоживущих газовых составляющих [1] (CO_2 , CO , N_2O , CH_4 и др.), которые оказывают влияние на радиационный режим Земли. Изменения содержания парниковых газов в атмосфере в пространстве и во времени недостаточно адекватно описываются существующими моделями распределения данных газов, так как их источники и стоки разнообразны и недостаточно изучены. Вариации радиационного баланса атмосферы приводят к аномальным явлениям (ураганам, смерчам, засухам, наводнениям и т.д.), к изменению погодных условий в отдельных районах Земли.

В настоящее время для изучения газового состава атмосферы со спутника используются в основном три пассивных метода регистрации проходящего атмосферного излучения: метод прозрачности, метод теплового излучения, метод отраженного и рассеянного солнечного излучения [2, 3]. Погрешность спутниковых измерений основных параметров атмосферы имеет следующие значения [2–4]: температура ($1\text{--}3\text{ К}$), содержание $\text{O}_3 \geq 5$, $\text{CO} \geq 10$, $\text{N}_2\text{O} \geq 20$, $\text{CH}_4 \geq 2,5$, $\text{NO}_2 \geq 10$, $\text{CO}_2 \geq 5$, $\text{H}_2\text{O} > 10\%$.

Основная масса N_2O расположена в слоях атмосферы на высотах $0\text{--}20\text{ км}$. Толщина слоя закиси азота, приведенного к нормальным условиям давления и температуры (760 мм рт. ст. и 273 К), в среднем для всей поверхности Земли составляет $0,25\text{ см}$. Молекулы N_2O поглощают инфракрасную радиацию наиболее интенсивно в полосах $550\text{--}630$, $1230\text{--}1330$, $1130\text{--}1220$, $2140\text{--}2260$, $2510\text{--}2605$, $3420\text{--}3510$, $3330\text{--}3390\text{ см}^{-1}$.

Содержание закиси азота в атмосфере определяют из химического анализа проб воздуха, взятых на разных высотах [5, 6], а также оптическими методами [7].

Одним из перспективных методов дистанционных оперативных измерений содержания N_2O в атмосфере со спутника является газокорреляционная спектроскопия [8]. Основными преимуществами методов корреляционной спектроскопии атмосферных газов является отсутствие влияния неселективного взаимодействия излучения со средой на погрешность измерений содержания исследуемого газа, обусловленное высокоэффективным и селективным спектральным светофильтром, которым служит проба самого искомого газа.

В 1978–1982 гг. корреляционным газоанализатором SAMS проводились измерения закиси азота в атмосфере со спутника NIMBUS-7. Регистрировалось собственное излучение атмосферы в полосе поглощения закиси азота в области 1299 см^{-1} ($7,7\text{ мкм}$) в касательных направлениях к поверхности Земли. Исследовано высотное распределение концентрации N_2O от 28 до 58 км . Погрешность измерений составляла $20\text{--}50\%$. Собственное излучение атмосферы и свечение лимба Земли в спектральной области 1266 см^{-1} ($7,9\text{ мкм}$) измерялись корреляционным радиометром ISAMS со спутника UARS (1991 г.). Получен вертикальный профиль концентрации закиси азота в атмосфере от 15 до 80 км . Высотный диапазон измерений содержания закиси азота в атмосфере приборами SAMS, ISAMS ограничен возрастающим влиянием на погрешность измерений молекул метана и воды в тропосфере, которые имеют полосы поглощения в спектральном интервале $1230\text{--}1330\text{ см}^{-1}$ [3, 8].

В настоящей статье выявлен участок спектра в уходящем излучении, в котором влияние на ин-

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

формационный сигнал радиометра неизмеряемых газовых составляющих атмосферы незначительно, и определены основные оптические параметры корреляционного радиометра для измерения содержания N_2O во всей толще атмосферы со спутника.

Спектральный диапазон излучения, регистрируемый радиометром

Анализ спектров ослабления теплового излучения Земли закисью азота и другими компонентами атмосферы (CO_2 , CO , CH_4 , H_2O , O_2 , N_2 , O_3) в ин-

фракрасной области $500-4000\text{ см}^{-1}$ показал, что в участке спектра $2530-2590\text{ см}^{-1}$ полосы поглощения N_2O наблюдается минимальное присутствие линий поглощения неизмеряемых атмосферных газов. На рис. 1 приведены функции пропускания излучения в участке спектра $2530-2590\text{ см}^{-1}$ газов N_2O , H_2O , CO_2 , CH_4 , SO_2 при температуре 296 К и давлении 1 атм (концентрация $N(H_2O) = 1\%$ в азоте) на трассе длиной L_k , соответствующей содержанию данного газа в атмосферном столбе. Видно, что в рассматриваемом участке спектра присутствуют линии поглощения молекул H_2O и CH_4 .

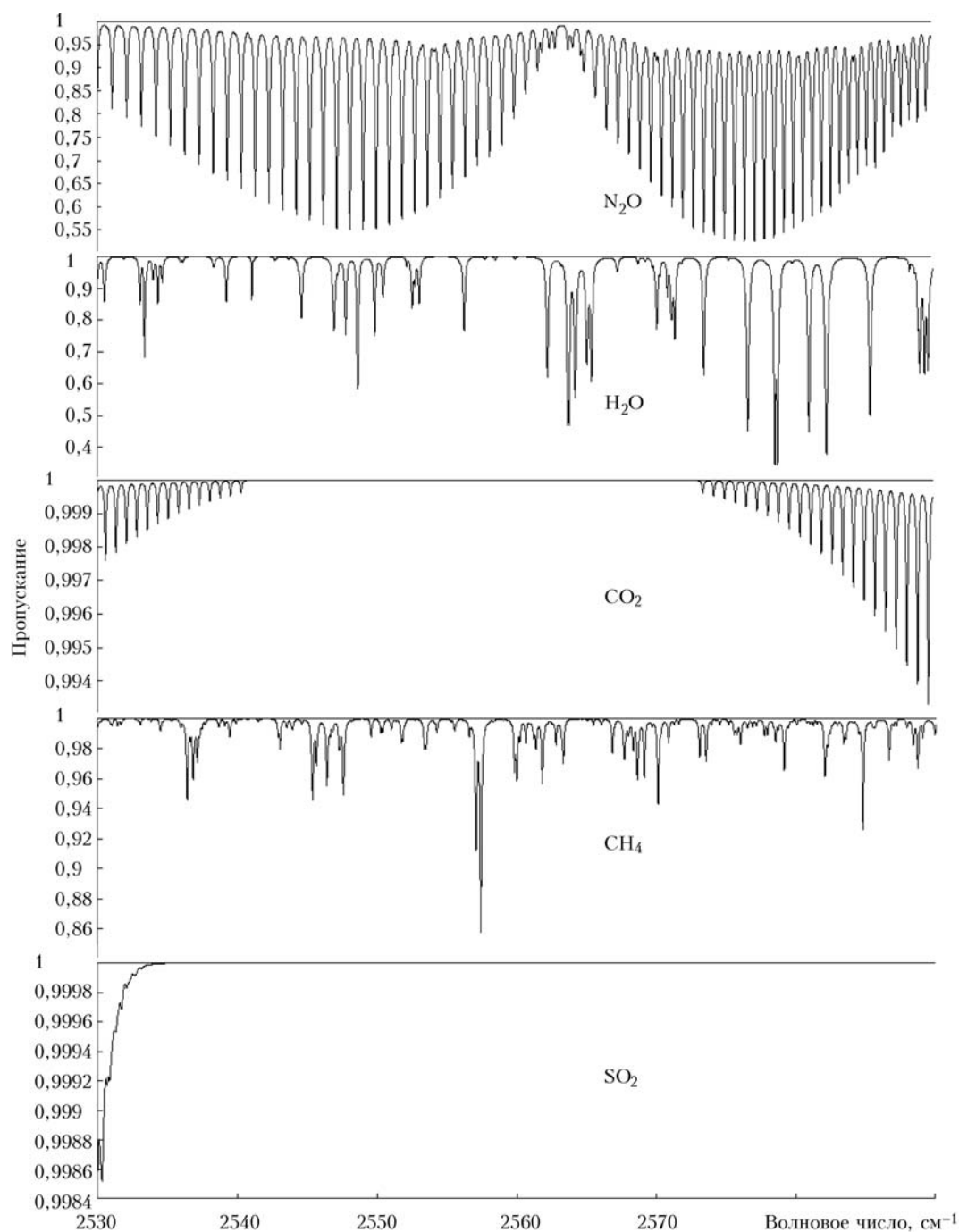


Рис. 1. Спектр пропускания в области $2530-2590\text{ см}^{-1}$: $N(N_2O) = 100\%$, $L_k = 0,25\text{ м}$, $N(H_2O) = 1\%$, $L_k = 5400\text{ м}$, $N(CO_2) = 100\%$, $L_k = 3,2\text{ м}$, $N(CH_4) = 100\%$, $L_k = 1,35\text{ м}$, $N(SO_2) = 100\%$, $L_k = 0,5\text{ м}$, $T = 296\text{ К}$, $P = 1\text{ атм}$

Параметры корреляционной кюветы радиометра

Методика расчета чувствительности выходного сигнала корреляционного радиометра к изменению вертикального распределения параметров атмосферы, температуры подстилающей поверхности, параметров корреляционной кюветы представлена в работе [9]. На рис. 2 приведена зависимость аппаратной функции (отношение разности выходных сигналов в каналах корреляционного радиометра к их сумме) при регистрации уходящего теплового излучения Земли от длины корреляционной кюветы, содержащей 100% N_2O , при давлении 1 атм.

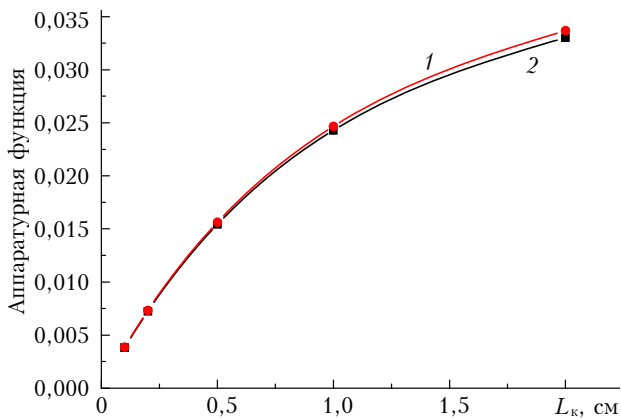


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала корреляционного радиометра при регистрации уходящего теплового излучения Земли от длины корреляционной кюветы, содержащей 100% N_2O , при давлении 1 атм: 1 — с учетом влияния неизмеряемых газов атмосферы; 2 — без учета ослабления излучения всеми молекулами воздуха

Кривая 1 построена с учетом ослабления излучения всеми молекулами воздуха, кривая 2 — без учета влияния неизмеряемых газов атмосферы. Наблюдаются увеличение аппаратных функций и рост их отличия между собой с увеличением массы (длины кюветы) закиси азота в корреляционной кювете.

Начиная с длины кюветы 0,5 см, замедляется рост аппаратной функции. Рассчитанный коэффициент корреляции между спектром ослабления закиси азота в корреляционной кювете и спектром ослабления атмосферы имеет максимальное значение для длины кюветы 0,5 см, что показывает максимальную (оптимальную) взаимосвязь между массой закиси азота в кювете и в атмосфере. Функция пропускания излучения в спектральном участке 2530–2590 cm^{-1} кюветы длиной 0,5 см, содержащей 100% N_2O , при давлении 1 атм имеет приемлемую для корреляционного радиометра величину и составляет $\sim 0,7$.

Проведены исследования влияния давления газа в корреляционной кювете на аппаратную функцию радиометра. Полуширина отдельной ли-

нии поглощения N_2O в корреляционной кювете при давлении 1 атм превышает полуширину спектральной линии поглощения закиси азота во всех слоях атмосферы (рис. 3).

Уменьшение давления в корреляционной кювете приводит к сужению линии поглощения молекул N_2O и росту максимального значения контура линий поглощения. Функция пропускания излучения в участке спектра 2530–2590 cm^{-1} при данных условиях увеличивается.

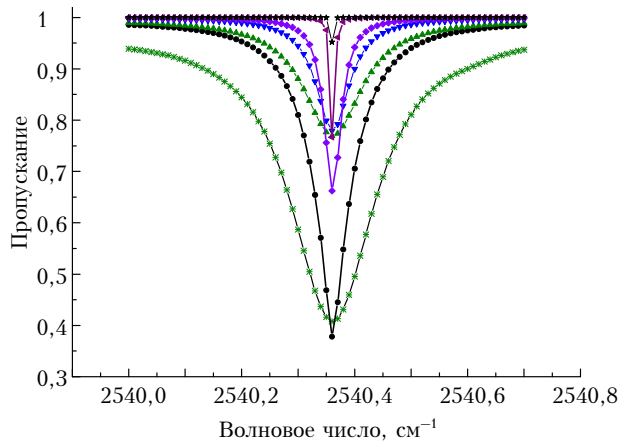


Рис. 3. Функция пропускания слоев атмосферы в спектральном диапазоне 2540–2540,7 cm^{-1} и корреляционной кюветы: \dagger — кюветы, τ — 0–5, ν — 5–10, Γ — 10–20, \wedge — 20–30, $_$ — 30–40, \bullet — 0–40 км

На рис. 4 представлена зависимость аппаратной функции радиометра, имеющего оптимальную массу газа в корреляционной кювете, от давления в ней.

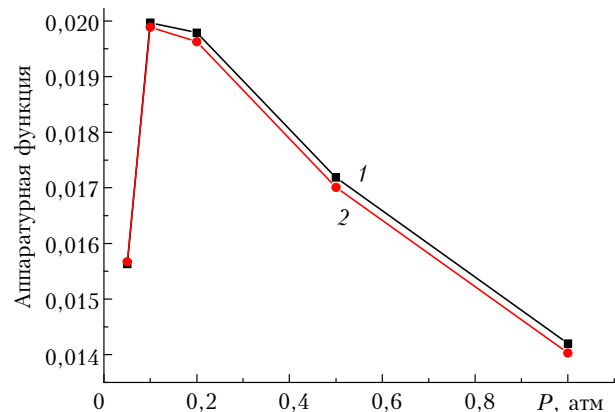


Рис. 4. Зависимость аппаратной функции радиометра, имеющего оптимальную массу газа в корреляционной кювете, от давления P в корреляционной кювете. Кривые 1, 2 соответствуют двум распределениям температуры по высоте, отличающимся сдвигом температуры на 5 К

Максимальное значение аппаратная функция достигает при давлении в кювете $\sim 0,2$ атм. Дальнейшее снижение давления в кювете приводит к уменьшению зависимости аппаратной функции от из-

менения температуры атмосферы при одновременном уменьшении полезного сигнала. Следовательно, для измерения содержания закиси азота во всей толще атмосферы при регистрации уходящего излучения в спектральном диапазоне 2530–2590 см⁻¹ необходима корреляционная кювета радиометра длиной ~2,5 см, наполненная закисью азота при давлении ~0,2 атм.

Влияние вариаций параметров атмосферы на показания радиометра

Тепловое излучение поверхности Земли (при температуре 280 К) в спектральном диапазоне 2530–2590 см⁻¹ (3,9526–3,861 мкм) составляет ~0,0246 Вт/м². Плотность мощности солнечного излучения в этом же спектральном диапазоне вне атмосферы имеет значение около 0,868 Вт/м². Отраженное и рассеянное солнечное излучение от поверхности Земли в участке спектра 2530–2590 см⁻¹ в дневное время суток в уходящей радиации из атмосферы соизмеримо с тепловым излучением поверхности Земли, что затрудняет интерпретацию дневных измерений содержания N₂O корреляционным радиометром на вертикальных трассах с аэрокосмических платформ.

Значение аппаратурной функции при измерении содержания закиси азота во всей толще атмосферы с оптимальными параметрами корреляционной кюветы составляет ~0,02. Если минимально регистрируемый приемниками радиометра уровень излучения равен 10⁻⁹ Вт, то для работы корреляционного радиометра с погрешностью 0,25% уровень сигнала в каждом канале радиометра должен превышать 10⁻⁵ Вт. Следовательно, радиометр для измерения содержания закиси азота во всей толще атмосферы с площадью входной оптики 3·10⁻² м² должен иметь угол поля зрения не менее 19°. С орбиты спутника, находящегося на высоте 100 км, диаметр земной поверхности, с которой регистрируется тепловое излучение, составит 33 км.

Состояние земной атмосферы характеризуется пространственно-временными изменениями метеорологических величин. Сведения о вертикальном распределении температуры, влажности воздуха и других газовых примесей необходимы при пассивном зондировании атмосферы космическими средствами. Измерения содержания закиси азота в атмосфере с помощью корреляционного радиометра требуют априорного знания вертикального распределения метеорологических величин атмосферы для выбора аппаратурных (калибровочных) функций в зависимости от района земного шара, времени суток.

Расчеты аппаратурной функции показали, что рост объемной концентрации паров воды от 0,1 до 1,3% в нижнем 5-км слое атмосферы приводит

к изменению выходного сигнала радиометра при измерении содержания N₂O во всей толще атмосферы не более 1,5%, а рост концентрации метана при аналогичных условиях от нуля до 1,6 ppm вызывает отклонения значений функции до 1%. Изменение вертикального распределения температуры в слоях атмосферы на 3–5 К приводит к более значительным отклонениям выходного сигнала радиометра, достигающим 3,5%. Наиболее чувствительны показания радиометра к точности задания температуры поверхности Земли. Отклонение температуры поверхности Земли на 1 К приводит к 2%-му изменению аппаратурной функции радиометра.

Заключение

Исследования показали, что спектральный участок 2530–2590 см⁻¹ является перспективным для проведения измерений содержания N₂O во всей толще безоблачной атмосферы корреляционным радиометром со спутника в ночное время суток. Необходима корреляционная кювета длиной ~2,5 см, наполненная закисью азота с давлением ~0,2 атм. Влияние на погрешность измерения N₂O в атмосфере изменений концентрации водяного пара на 0,5% в воздухе, концентрации других неизмеряемых газов атмосферы, вертикального распределения температуры атмосферы и подстилающей поверхности Земли на 1 К не превышает 5%.

1. Седунов Ю.С., Авдюшин С.И., Борисенков Е.П., Волковецкий О.А., Петров Н.Н., Рейтенбах Р.Г., Смирнов В.И., Черников А.А. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 509 с.
2. Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 193–208.
3. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1989. Т. 25, № 5. С. 451–472.
4. Грибанов К.Г., Имасу Р., Топтыгин А.Ю., Блойтин В., Наумов А.В., Захаров В.И. Метод и результаты по определению метана в атмосфере Западной Сибири из данных сенсора AIRS // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 10. С. 881–886.
5. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофонов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464.
6. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Илев Г.А., Козлов А.С., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сафатов А.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследований окружающей среды // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
7. Петров С.Б., Смирнов А.П. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования

и оперативного контроля окружающей среды // Оп-
тич. ж. 2000. Т. 67, № 5. С. 82–93.

8. *Будников А.А.* Методы и аппаратура дистанционного
зондирования для глобального экологического мони-
торинга // Оптич. ж. 1992. Т. 59, № 8. С. 6–11.

9. *Баландин С.Ф., Старновский С.А., Шишигин С.А.*
Анализ возможного применения метода корреляции
газовых светофильтров для измерения содержания ме-
тана в атмосфере со спутника // Оптика атмосф. и
океана. 2008. Т. 21, № 10. С. 897–901.

S.F. Balandin, S.A. Shishigin. Basic parameters of the correlation IR radiometer for satellite measurement of the nitrogen oxide in the atmosphere.

Spectral range of IR radiation of $2530\text{--}2590\text{ cm}^{-1}$ is defined for measurement of measurement of N_2O in the atmosphere from the satellite by the correlation method, the optimum parameters of radiometer correlation cell are defined. The influence of change in atmosphere of content of gases (H_2O , CO , O_3 , N_2O , CH_4), vertical distribution of temperature of air, temperature of a spreading surface of the Earth on information signal of radiometer.