

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
С ПОМОЩЬЮ БОРТОВОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА С ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
АЭРОСТАТОВ

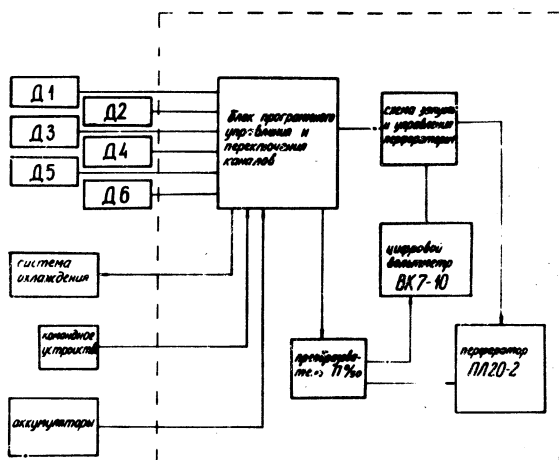
В. В. Иванов, А. В. Карташев, С. Г. Кукли, М. Н. Митров

УДК 551.521.

Впервые получены спектры уходящего излучения атмосферы Земли в широкой области $170 \text{ см}^{-1} - 710 \text{ см}^{-1}$, включающей вращательную полосу поглощения H_2O ($170 \text{ см}^{-1} - 420 \text{ см}^{-1}$), в видимом и ближнем инфракрасном с разрешением до $2,5 \text{ см}^{-1}$ и средней ошибкой $I - 2 \cdot 10^{-7} \text{ вт. см}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$. Измерения проводились при помощи бортового фурье-спектрометра БИС-2 МИАН с высоты до 33 км.

В течение ряда лет большое внимание в связи с развитием космической метеорологии привлекает проблема спектрального состава теплового излучения Земли в инфракрасной области спектра. В 1962 г. впервые был опубликован спектр в диапазоне 5-15 мкм, полученный прибором, имеющим разрешающую силу ~ 40 со спутника /1/. Далее диапазон был расширен до 38 мкм, но уже с меньшей разрешающей силой (~ 20) /2/. Развитие фурье-спектроскопии позволяет еще более расширить диапазон и увеличить разрешение. Применяя этот метод, нам удалось зарегистрировать спектр излучения Земли в диапазоне 10-60 мкм с разрешающей силой до 300. Этот диапазон включает в себя полосы CO_2 и H_2O . Наиболее важной особенностью его является излучение вращательной полосы воды, изучение которой требует разрешения не более 5 - 10 см^{-1} и, по-существу, проведено в данной работе впервые.

В 1968 г. нами было предложено использовать вращательную полосу воды для восстановления высотного профиля влажности в атмосфере, отмечены важные преимущества этой полосы по сравнению с общепринятой вращательно-колебательной полосой 6,3



Р и с. I. Блок схема аэростатного комплекса.

и т.д. (слабая зависимость от температуры и т.д.) и разработан Фурье-спектрометр для регистрации спектра в данном диапазоне /3/.

Для опробования метода было решено проводить измерения с аэростатов ($H \approx 30$ км), так как основная масса газа атмосферы, участвующая в погодообразующих процессах, для которой существенно знать высотный профиль температуры и влажности, расположена ниже.

Для проведения эксперимента был построен автоматический аэростатный комплекс, включавший в себя в качестве одного из датчиков бортовой Фурье-спектрометр БИФС-2 ФИАН /3,4/, снабженный устройством для калибровки в полете.

Фурье-спектрометр и другие датчики (температуры, давления и т.д.) были включены в общую систему регистрации сигналов, состоящую из следующих основных частей (рис. I): а) программного блока, осуществляющего "опрос" датчиков (каналов) по задан-

ной программе, б) цифрового вольтметра ВК7-10 для преобразования аналог-код, в) перфолатора ПЛ-20-2 с блоком запуска и управления для формирования стартовых импульсов на перфолатор, а также преобразования параллельного кода на выходе цифрового вольтметра в последовательный и усиления кодовых импульсов. При записи на восьмидорожечную перфоленту динамический диапазон регистратора равен 1000 в каждом канале при частоте замера 10 гц.

Автоматическое включение и выключение аппаратуры осуществлялось командным устройством с двумя барореле, задублированными временным механизмом.

Имитация нулевого сигнала при каждом периоде модуляции осуществлялась полостью черного тела, охлаждаемого жидким азотом. Калибровка производилась от второго черного тела ($T \sim 260^\circ\text{K}$; температура измерялась с точностью $\sim 0,1^\circ$), изучение которого направлялось на вход прибора и регистрировалось периодически после записи пары интерферограммы атмосферы. Охлаждение до температуры 77°K осуществлялось изолированной от внешней среды криогенной системой, где циркулировал жидкий азот.

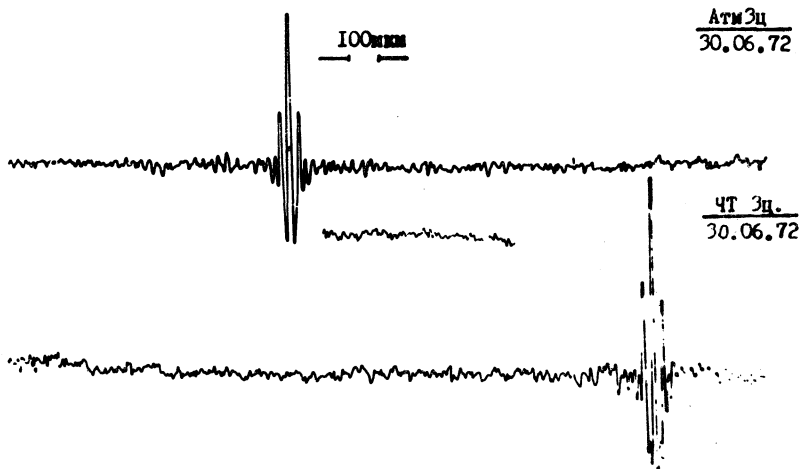
Испытания всего комплекса, а также регулировка подачи жидкого азота проводились в термобарокамере в условиях, близких к полетным.

Представляло интерес получить данные в разные сезоны. Поэтому первый полет аппаратуры был осуществлен утром 25 января 1972 года (время пребывания на максимальной высоте 33 км - I час 30 минут, малая облачность), второй полет проходил ночью 30 июня 1972 года (время работы аппаратуры на максимальной высоте 29 км - 7 часов 30 минут, практически безоблачно). Оба полета проводились в средних широтах Европейской части СССР.

Интервал между последовательными включениями Фурье-спектрометра в первом полете составлял 34 минуты, во втором - I час 10 минут. Кроме того, во втором полете была повышена в 10 раз точность регистрации интерферограммы и соответственно увеличено время ее записи от 2 до 20 минут.

В результате двух полетов было зарегистрировано 6 интерферограмм излучения атмосферы. На рисунке 2 показана пара типичных интерферограмм, полученных в третьем цикле работы Фурье-

спектрометра в летнем полете. Каждой интерферограмме соответствует общее перемещение подвижного зеркала интерферометра на 1,5 мм (3 мм по разности хода). Интервал между замерами равен 2 мм по разности хода.



Р и с. 2. Интерферограммы излучения атмосферы (вверху) и калибровочного черного тела с температурой 268°К (внизу), полученные в одном из циклов работы Фурье-спектрометра 30 июня 1972 г.

Так как в эксперименте не производилось отметки нулевой разности хода, при обработке осуществлялось комплексное Фурье-преобразование двухсторонней интерферограммы. Сначала вычислялся фазовый спектр по формуле.

$$\varphi(\sigma) = \arctg \frac{m_1(\sigma)}{m_2(\sigma)},$$

где m_1 и m_2 - действительная и мнимая части комплексного интеграла Фурье, σ - частота излучения в см^{-1} . Затем вычислялся спектр по формуле

$$B(\sigma) = m_2(\sigma) \cos \varphi(\sigma) + m_1(\sigma) \sin \varphi(\sigma).$$

Такая операция в отличие от обычной, когда спектр вычислялся как корень квадратный из суммы $(m_2^2 + m_1^2)$, сохраняет информацию о величине и знаке шума за пределами спектральной области

ти. Аподизация производилась умножением интерферограммы на сглаживающую функцию в виде треугольника. Обработка результатов экспериментов производилась на машине М-220. Интерферограммы вводились в машину с перфолент, полученных в полетах.

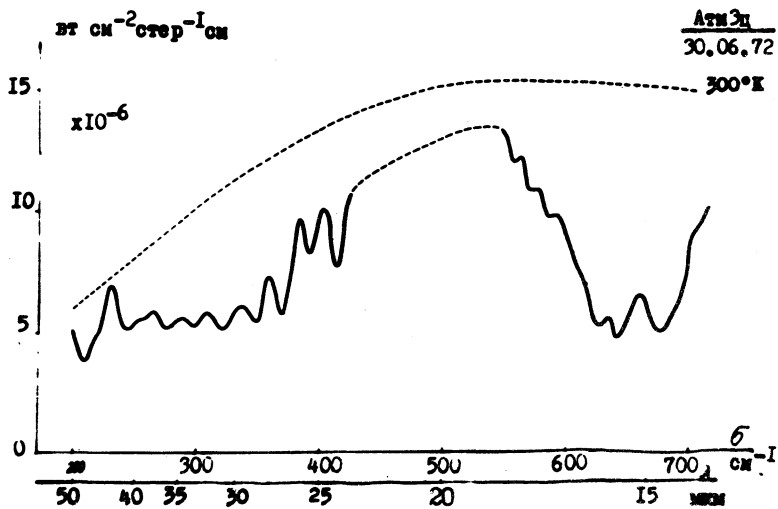
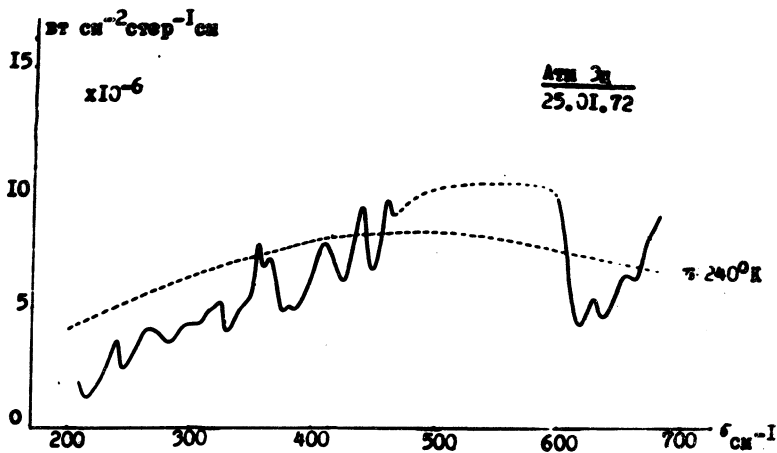
На рис. 3 сверху показан спектр излучения атмосферы, полученный в первом полете, внизу - во втором. Пунктир - спектр излучения черного тела при температуре приземного слоя воздуха. Спектры в абсолютных единицах получены из отношения интенсивностей спектра атмосферы и спектра калибровочного черного тела. Разрешение в спектрах (с учетом аподизации) составляет для летнего полета 10 см^{-1} , для зимнего 15 см^{-1} . Среднеквадратичный шум в зимнем спектре составляет $2 \cdot 10^{-7} \text{ вт/см}^2 \cdot \text{стер.см}^{-1}$, в летнем - $10^{-7} \text{ вт/см}^2 \cdot \text{стер.см}^{-1}$. Отождествление длинноволновой части спектра с лабораторным вращательным спектром поглощения водяного пара /5/ показывает хорошее соответствие. Максимальное разрешение, достигнутое в полете, составляет $2,5 \text{ см}^{-1}$.

При анализе полученных данных естественно учитывать сведения о состоянии атмосферы, которые имеются в нашем распоряжении из пусков радиозондов в районе полета.

Количественное сравнение будет сделано после решения обратной задачи, однако уже сейчас можно сделать качественный анализ.

В диапазоне $570 - 640 \text{ см}^{-1}$ интенсивность в спектре монотонно падает (аналогичное падение интенсивности наблюдается на частотах $710 - 690 \text{ см}^{-1}$), так как в излучении доминируют все более и более высокие слои тропосферы, где температура уменьшается с высотой. На частоте 645 см^{-1} наблюдается минимум, так как основной вклад в излучение на этой частоте вносит верхняя тропосфера и тропопауза ($H \sim II \text{ км}$) с минимальной температурой 220°К . При приближении к максимуму поглощения CO_2 основной вклад в излучение начинает вносить стратосфера, где температура растет с высотой (инверсия температуры). На частоте 670 см^{-1} (максимум) в основном излучают слои на высоте 30 км с температурой 235°К .

В полосе поглощения воды ($170 - 420 \text{ см}^{-1}$) наблюдается существенное различие в ходе летних и зимних спектров. В последних интенсивность в максимуме и на крыле полосы меньше, что



Р и с. 3. Спектры излучения атмосферы, полученные в зимнем (вверху) и летнем (внизу) полетах.

объясняется более низкой температурой атмосферы зимой на высотах 0 - 10 км и 17 - 30 км.

В результате работы можно сделать следующие выводы:

1. Получены спектры восходящего излучения атмосферы Земли с высоты 29 - 33 км в областях поглощения CO_2 $570 - 710 \text{ см}^{-1}$ и H_2O $170 - 420 \text{ см}^{-1}$ в зимних и летних условиях. Разрешение в спектрах от 2,5 до 15 см^{-1} , а средняя ошибка заключена в пределах $(1 - 2) \cdot 10^{-7} \text{ вт/см}^2 \text{ стерад. см}^{-1}$. Спектры в области вращательной полосы H_2O получены впервые.

2. Разработан и опробован в двух полетах автоматический измерительный аэростатный комплекс, включающий бортовой инфракрасный Фурье-спектрометр, работающий в области спектра 10 - 60 мкм.

В заключение авторы считают своим долгом выразить искреннюю благодарность Л. П. Константиновой и А. М. Никишиной за помощь в обработке материалов эксперимента.

Поступила в редакцию
9 января 1973 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. Block, A. Zachor. Appl. Opt., 3, 200 (1964).
2. А. И. Лебединский и др. Сб. "Исследование космического пространства", стр. 65. изд-во "Наука", 1965 г.
3. М. Н. Марков, В. И. Ведерников, В. В. Иванов, А. В. Карташев, В. С. Петров. Препринт ФИАН № 189, 1969 г.
4. М. Н. Марков, В. И. Ведерников, В. В. Иванов, А. В. Карташев. Приборы и техника эксперимента, № 5, 169 (1970).
5. С. N. Palmer. Journ. Opt. Soc. of Amer., 47, 1024 (1957).