

**В.Ф. Фатеев, В.Н. Лагуткин, Ю.В. Слынько**

V. P. Fateev, V.N. Lagutkin, Y.V. Slyngo

**Возможности применения спектроскопических приборов для космических наблюдений газообразных выбросов в атмосфере**

**Use of small satellites with spectroscopic devices for observation of gaseous exhausts in atmosphere**

Рассмотрены спектры излучения газообразных объектов, пропускания атмосферы и фона при мониторинге атмосферы с малых космических аппаратов. Проведены оценки требуемого спектрального разрешения спектроскопических приборов. Показано, что более предпочтительным является применение интерферометров с субнанометровым спектральным разрешением, настраиваемых на интенсивные спектральные линии газовых образований. Определены особенности задачи адаптивного выбора спектральных линий.

Spectra of gaseous objects, atmospheric transmission and background are considered as applied to atmosphere monitoring by use of small satellites. Estimations of required spectral resolution of spectroscopic devices are obtained. It is shown that interferometers with sub-nanometers spectral resolution tuned to intensive spectral lines of gaseous objects are more preferable. Particularities of the task of spectral lines selection are determined.

В рамках исследования направлений развития и применения малых космических аппаратов (МКА) значительное внимание уделяется проблеме создания многоспектральных датчиков для разнообразных систем мониторинга, управления их работой и автоматической обработки полученных ими данных. В работах [1,2] эта

проблема рассматривается применительно к задачам дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) с МКА и, в частности, рассматриваются методы выбора количества спектральных каналов и их расстановки на оси длин волн. Благодаря тому, что спектральные образы наблюдаемых при ДЗЗ объектов являются непрерывными и в той или иной степени гладкими функциями длины волны, оказалось возможным при решении задачи определения положения спектральных каналов на оси длин волн использовать методы ортогональных разложений функций [2]. Задача определения ширины полос спектральных каналов детально не рассматривалась, т.к. применительно к ДЗЗ значение этого параметра не является критическим.

Спектральные образы газовых образований в атмосфере как естественного, так и искусственного происхождения кардинально отличаются от образов наземных объектов, т.к. спектры газов являются линейчатыми и как функции длины волны представляют собой совокупность иглообразных пиков разной высоты. В данной работе эта особенность спектров газов используется как базовая при выработке методического подхода к определению принципов и облика аппаратуры наблюдения газообразных выбросов в атмосфере.

Как известно, взаимодействие оптического излучения с газообразной средой описывается уравнением переноса излучения [3]. Решение этого уравнения при отсутствии рассеяния можно представить в виде

$$B_{\nu}(\mathbf{r}(S), \mathbf{n}) = B_{\nu 0}(\mathbf{n})T_{\nu}(0, S; \mathbf{n}) + \int_0^S E_{\nu}(\mathbf{r}(P))dT_{\nu}(P, S; \mathbf{n})dP \quad (1)$$

где  $B_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{n})$  - спектральная плотность яркости излучения как функция координат  $\mathbf{r}$  и направления наблюдения  $\mathbf{n}$ ,  $P$  - длина пути вдоль направления  $\mathbf{n}$  ( $dP > 0$ ),  $S$  - полный путь,  $\nu = 1/\lambda$  - частота (в  $\text{см}^{-1}$ ),  $\lambda$  - длина волны,  $E_{\nu}(\mathbf{r}(P))$  - спектральная плотность излучения абсолютно черного тела, определяемая формулой Планка,  $T_{\nu}(P, S, \mathbf{n})$  - спектральная

функция пропускания газообразной среды на пути от точки  $\mathbf{r}(P)$  до точки  $\mathbf{r}(S)$  (положение наблюдателя) вдоль направления наблюдения, определяемая соотношением

$$T_\nu(P, S; \mathbf{n}) = \exp\left[-\int_P^S \beta_\nu(\mathbf{r}(S')) dS'\right] \quad (2)$$

$\beta_\nu(\mathbf{r})$ - спектральный показатель поглощения. Заметим, что функция  $T_\nu(P, S, \mathbf{n})$  является неубывающей функцией параметра  $P$ , причем  $0 \leq T_\nu(P, S, \mathbf{n}) \leq 1$ .

Функция  $B_{\nu 0}(\mathbf{n})$  - представляет собой спектральную плотность потока излучения внешнего источника, находящегося на линии наблюдения за газообразным объектом, т.е. фона подстилающей поверхности, облаков или звезд.

Выражение для спектрального показателя поглощения излучения в многокомпонентном газе имеет вид

$$\beta_\nu(\vec{r}) = \sum_k \rho_k(\vec{r}) \beta_{\nu k}(T(\vec{r}), P(\vec{r})), \quad (3)$$

где  $\rho_k(\mathbf{r})$  - плотность  $k$ -той компоненты газа,  $\beta_{\nu k}(T, P)$  - коэффициент поглощения  $k$ -той компоненты для излучения с частотой  $\nu$ , который представляет собой суперпозицию вкладов отдельных спектральных линий

$$\beta_{\nu k}(T, P) = \sum_i S_{ki} F_k(\nu - \nu_{ki}, \gamma_{ki}), \quad (4)$$

$S_{ki}$  - интенсивность  $i$ -той линии,  $F_k(\nu - \nu_{ki}, \gamma_{ki})$  - контур линий,  $\nu_{ki}$ - несущая частота,  $\gamma_{ki}$  - полуширина контура. Наиболее популярной аппроксимацией контура спектральных линий является лоренцевский контур (подробнее см. [4])

$$F_k(\nu - \nu_{ki}, \gamma_{ki}) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma_{ki}}{(\nu - \nu_{ki})^2 + \gamma_{ki}^2} \quad (5)$$

Интенсивность и полуширина линий зависит от температуры и давления. Для атмосферных газов типичная полуширина линий составляет: в нижней атмосфере  $\gamma \sim 10^{-1}$

$\text{см}^{-1}$  ( $\Delta\lambda \sim 10^{-1}$  нм для средневолнового ИК диапазона), в верхней атмосфере  $\gamma \sim 10^{-2} - 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  ( $\Delta\lambda \sim 10^{-2} - 10^{-3}$  нм).

Соотношения (1)-(5) представляют собой количественную модель сигналов и помех в различных условиях наблюдения газообразных объектов в атмосфере с МКА. Основную роль в этой модели играет спектральная функция пропускания газообразной среды (2), которая согласно (3)-(5) функционально зависит от пространственных распределений состава, температуры и давления газообразных объектов. В случае не разреженных газовых образований эта функция, в основном принимая значения около единицы, имеет очень узкие, порядка ширины контуров спектральных линий, и глубокие, вплоть до нуля, провалы. В соответствии с (1) это означает, что принимаемое излучение от газовых образований сконцентрировано только в этих узких полосах (линиях), вне этих узких полос принимается излучение внешних источников, которое в этом случае является фоном наблюдения. В случае разреженных газовых образований спектральная функция пропускания может не иметь глубоких провалов даже в сильных линиях поглощения газов. В этом случае их собственное тепловое излучения может быть мало по сравнению с излучением фона. Тем не менее, если пространственное распределение фона относительно плавное или оно известно, газовые образования можно наблюдать методом «на просвет», выделяя области потемнения на изображениях фона, полученных в линиях поглощения газов.

Наблюдение и распознавание газообразных выбросов в атмосфере можно реализовать на базе МКА со спектроскопическими приборами. Каждый МКА в зависимости от орбиты может осуществлять наблюдение газообразных выбросов в атмосфере в полосе шириной  $\sim 6000$  км вдоль орбиты. Использование развитой орбитальной группировки МКА позволит обеспечить, во-первых, оперативный контроль атмосферы на всех широтах и, во-вторых, возможность триангуляционных измерений, на

основе которых можно определить пространственное положение выброса и оценить его пространственную конфигурацию.

В качестве возможных вариантов спектроскопических приборов для МКА следует рассматривать Фурье-спектрометры и перестраиваемые интерферометры [5]. Оба типа спектрометров имеют высокое спектральное разрешение, до  $\sim 10^{-2}$  см<sup>-1</sup> и меньше [6]. Сравнительный анализ этих приборов показывает, что применение на МКА перестраиваемых интерферометров более предпочтительно. Во-первых, перестраиваемым интерферометром можно управлять по программе, поочередно настраивая его на наиболее интенсивные спектральные линии газовых образований, которые известны. Это обеспечивает большее быстроедействие, что очень важно для реализации оперативного кругового обзора пространства с низкоорбитальных МКА. Во-вторых, интерферометры, настраиваемые на интенсивные спектральные линии газовых образований, имеют более высокую чувствительность, т.к. влияние фонов в узких линиях сводится к минимуму. В-третьих, интерферометры могут работать в более широком поле зрения и объединяться с многоэлементными фотоприемниками.

При адаптивном определении набора спектральных линий, за которыми должен следить спектральный прибор, необходимо учитывать следующую информацию: возможный состав наблюдаемых газообразных объектов, спектральную функцию пропускания атмосферы, спектральную функцию яркости фона. На основе известных составов газовых образований можно заранее сформировать каталог интенсивных спектральных линий. На рис. 1 (а, б) для иллюстрации приведены расчетные фрагменты спектра излучения выхлопных продуктов сгорания углеводородного топлива на высотах верхней атмосферы в двух спектральных интервалах средневолновой части ИК диапазона. Расчет выполнен на модели, описанной в работе [7].

На рис. 1а хорошо видны отдельные линии и яркий дуплет паров воды на частотах  $\nu \approx 2994.5 \text{ см}^{-1}$ , линии имеют ширину  $\sim 0.1 \text{ см}^{-1}$ . Фрагмент спектра, показанный на рис. 1б, интересен тем, что на нем в интервалах частот  $3688 - 3689 \text{ см}^{-1}$  и  $3691 - 3692 \text{ см}^{-1}$  наблюдаются тесные группы интенсивных линий с общей шириной  $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$ . Из рис. 1 видно, что для выделения излучения в спектральных линиях спектроскопические приборы должны обеспечивать спектральное разрешение  $\sim (1-5) \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ , т.е. на уровне десятых долей нанометра для средневолнового ИК диапазона.

На рис. 2 приведен график спектральной функции пропускания атмосферы, рассчитанной на модели [8] в предположении, что газовое образование находится на высоте 10 км и зенитный угол наблюдения равен  $45^\circ$ . Провалы функции пропускания обусловлены линиями поглощения излучения молекулярными атмосферными составляющими, главным образом, водяным паром и углекислым газом, на пути от объекта до МКА.

На фиг. 3 приведены графики расчетной спектральной плотности яркости фона облаков с высотой верхней границы облаков 5 км в полосе частот  $3680-3710 \text{ см}^{-1}$  (в ДБ к  $\text{Вт/м}^2/\text{мкм/ср}$ ). Расчет проведен на модели [9] с модернизированным модулем пропускания атмосферы [8]. Спектр фона облаков имеет «обратную» линейчатую структуру, в которой узкие и глубокие провалы (на 15-20 ДБ) обусловлены линиями поглощения атмосферных газов.

Спектры пропускания атмосферы и яркости фона зависят от состояния атмосферы, параметров ее влажности и облачности. Совместный анализ спектральных функций излучения газовых образований, фона и пропускания атмосферы, подобных представленным на рис. 1-3, приводит к заключению, что задача оптимального выбора по критерию максимума отношения сигнал-помеха спектральных линий для настройки интерферометра должна решаться адаптивно с учетом реального состояния атмосферы в

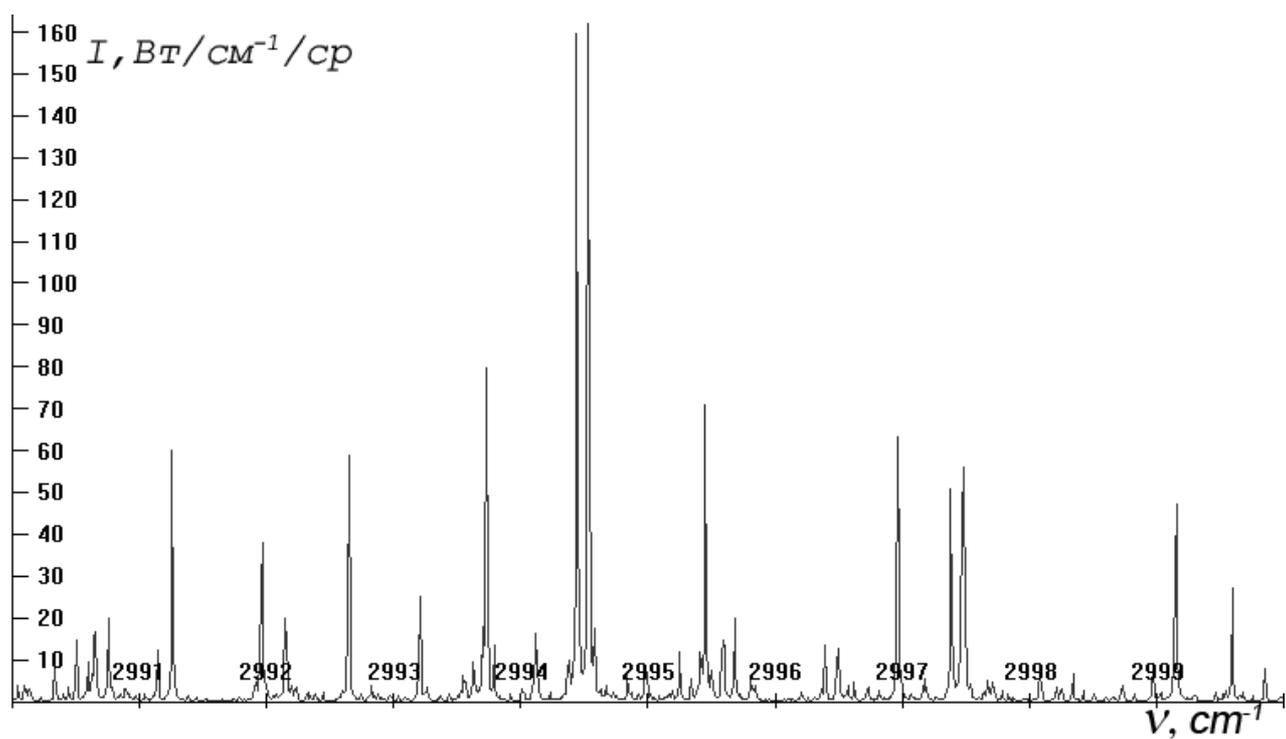
текущей зоне контроля МКА. При этом наибольшие значения отношения сигнал-помеха будут иметь место для тех линий газовых образований, которые располагаются в областях минимума спектра фона.

Таким образом, проведенное рассмотрение показало, что применение спектроскопических приборов с субнанометровым разрешением для наблюдения газообразных выбросов в атмосфере является перспективным направлением работ по созданию МКА.

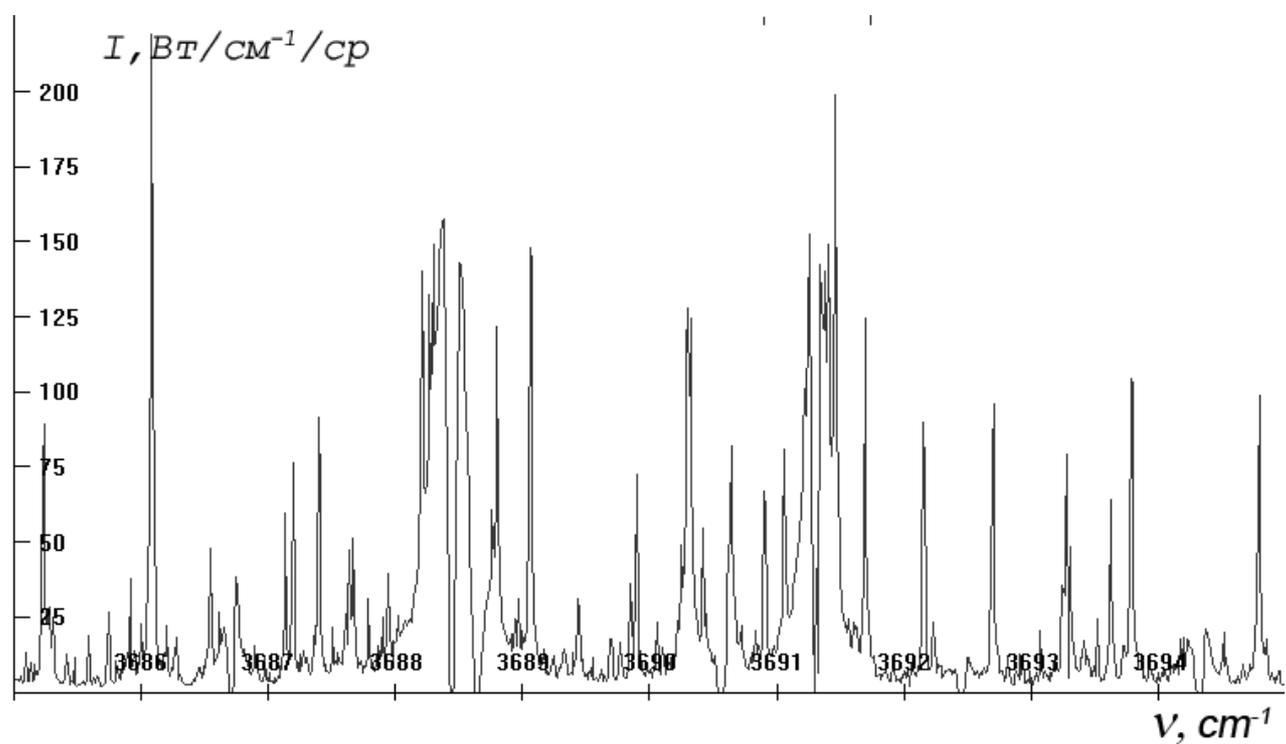
### Литература

1. Фатеев В.Ф., Миньков С.А. Новое направление развития МКА дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т.47, №3, С. 18 – 22.
2. Мальцев Г.Н., Козин И.А., Фатеев В.Ф. Методы выбора наиболее информативных спектральных каналов при дистанционном зондировании земли с малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т.50, №6, С. 23 – 31.
3. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. - М.: Иностранная литература, 1953. 431 с.
4. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. - М.: Советское радио, 1970. 496 с.
5. Курбатов Л.Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. – М.: Издательство МФТИ, 1999. 320 с.
6. Справочник по инфракрасной технике / под ред. Вольф У. и Цисис Г., т.4, М.: Мир, 1999. 472 с.
7. Лагуткин В. Н., Слынько Ю.В. Метод расчета спектральных яркостей потока смеси газа и частиц // Труды XLX научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” , Ч. 1. М.: МФТИ, 2007, С. 119 - 121.

8. Слынько Ю.В. Модель расчета переноса излучения на основе открытой базы данных HITRAN // Вопросы радиоэлектроники, сер. РТЛ, 2007, вып. 4. С. 5-11. М.: ЦНИИ Электроника.
9. Лагуткин В.Н., Лукьянов А. П., Подкорытов Е.Н., Репин В.Г.. Трехмерная динамическая модель полей яркости фона, использующая расчетные индикатрисы многократного рассеяния излучения в облаках и изображения, полученные метеорологическими спутниками // Вопросы радиоэлектроники, сер. РТЛ, 2004г., вып. 1, С. 101-117. М.: ЦНИИ Электроника.



a)



б)

Рис.1

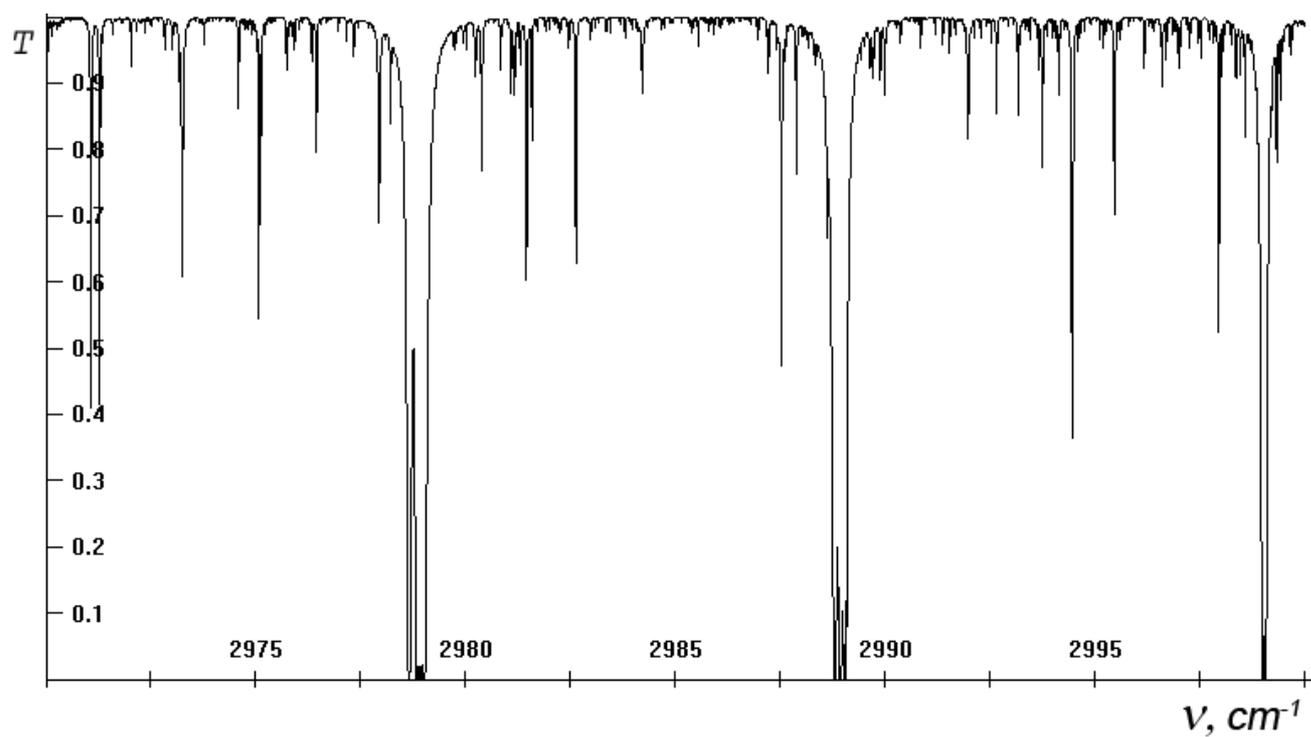


Рис. 2.

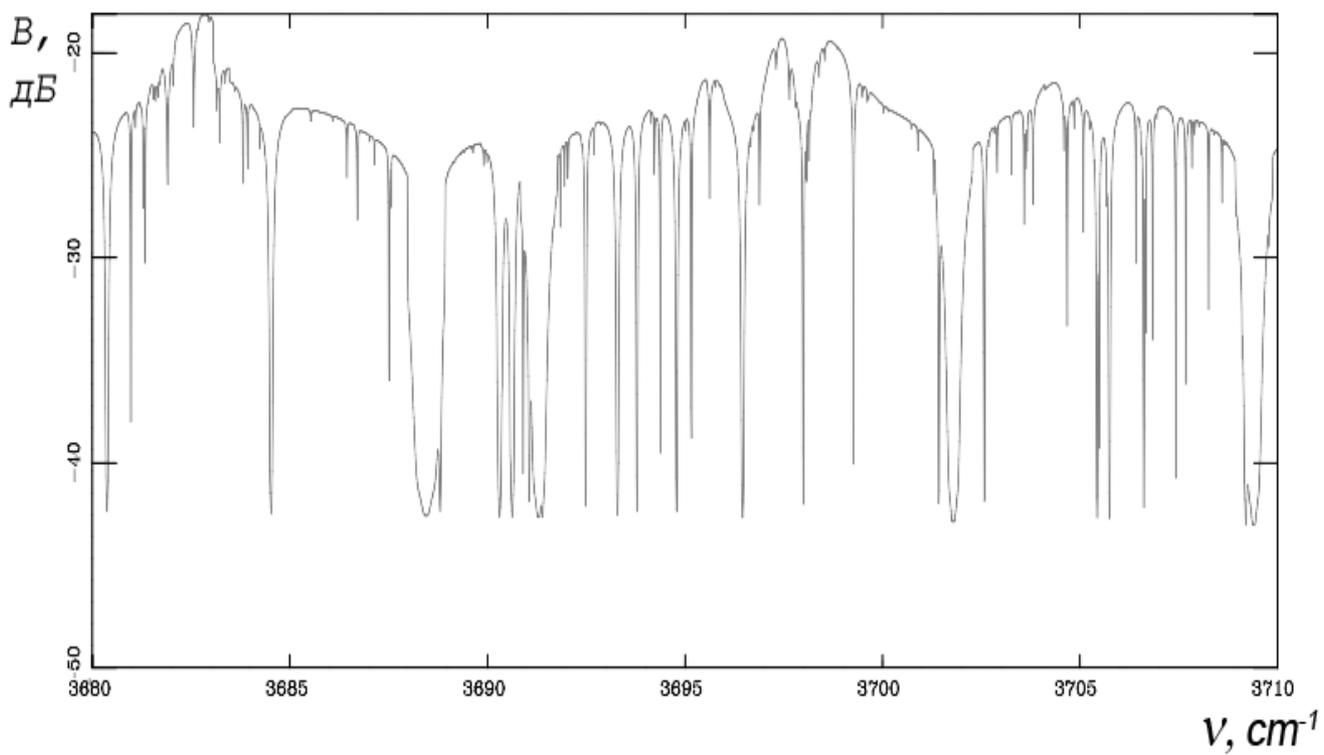


Рис. 3