

ИК ИЗЛУЧЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗМУЩЕННОЙ ВЧ РАДИОВОЛНОЙ, И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО НАБЛЮДЕНИЯ

Б. Ф. Гордисц, В. А. Домбровская, В. В. Иванов, А. Н. Степанович

Теоретически исследовано влияние распространяющейся вертикально вверх мощной ВЧ радиоволны на ИК излучение нижней ионосферы. Показана возможность экспериментального обнаружения этого излучения из космоса.

Нагрев ионосферы мощными ВЧ радиоволнами приводит к ее свечению в оптической области спектра, наблюдаемому с Земли /1/ и возникающему вследствие возбуждения электронных уровней атома кислорода в столкновениях с ионосферными электронами, разогретыми полем ВЧ радиоволны до температур 2000—4000 К. Однако главным каналом трансформации энергии ионосферных электронов является возбуждение в столкновениях колебательных уровней молекул N_2 . В свою очередь, колебательный обмен возбужденных молекул N_2^* с молекулами CO_2 по каналу $N_2^* + CO_2(00^00) \rightarrow N_2 + CO_2(00^01)$ с последующим излучением молекулами CO_2 кванта с длиной волны $\lambda = 4,3$ мкм известен как основной механизм, обеспечивающий отток колебательной энергии N_2 на высотах ≤ 100 км /2/. Из этого следует, что при исследовании энергетики атмосферы интересным является вопрос о возможности экспериментального обнаружения и измерения этого излучения. Так как нижняя атмосфера Земли непрозрачна для ИК излучения в области спектра вблизи 4 мкм, то речь может идти о регистрации этого излучения из космоса.

Целью данной работы является расчет интенсивности указанного ИК излучения и определение основных требований к измерительной аппаратуре для его экспериментального обнаружения. Мы не будем проводить здесь детального анализа задачи, а лишь кратко опишем использованную методику расчета и представим его основные результаты.

Были рассчитаны потоки ИК излучения в полосе 4,3 мкм молекулы CO_2 на различных высотах ионосферы при распространении вертикально вверх мощной ВЧ радиоволны, излучаемой наземным источником. Расчет проводился на основе детальной модели верхней атмосферы Земли, разработанной в ФИАНе и подробно описанной в /2/. Эта модель позволяет находить концентрации основных составляющих атмосферы N_2 , O_2 , O , ионосферных электронов N_e , ионов N_2^+ , O_2^+ , O^+ , малых атмосферных составляющих NO , NO^+ , CO , CO_2 , H_2O , O_3 , N , H , метастабильных атомов, молекул и ионов $O(^1D)$, $N(^2D)$, $O_2(^1\Delta_g)$, $O(^2D)$, $O_2(^4\Pi)$, а также

температуры газа T , ионов T_i и электронов T_e . Концентрация основных компонент N_2 , O_2 , O и температура газа T находится из эмпирической модели атмосферы CIRA-72. Концентрации малых компонент (включая метастабильные и заряженные частицы), колебательная температура молекул N_2 , а также температуры T_e и T_i рассчитываются в модели "самосогласованно" из стационарной системы связанных уравнений баланса энергии (для электронов и ионов), химической и колебательной кинетики. В нашей модели учитываются все наиболее важные процессы (более 120), влияющие на формирование ИК излучения верхней атмосферы. В отличие от /2/, в настоящей модификации модели использованы более современные значения констант скоростей процессов, учтен ряд новых процессов (в том числе, пленение ИК излучения в различных полосах, включая полосу $4,3 \text{ мкм CO}_2$), более детально исследуется колебательная кинетика, а именно, рассчитываются заселенности 16-ти колебательных уровней молекулы N_2 , 12-ти, 28-ми, 9-ти, 10-ти колебательных уровней молекул соответственно NO , NO^+ , OH и CO , а также заселенности ряда колебательных уровней многоатомных молекул CO_2 , N_2O , H_2O и O_3 . Кроме этого, при расчете T_i и T_e учитывается и такой возможный механизм разогрева, как разогрев квазистационарным электрическим полем. Следует отметить, что столь детальная модель позволяет рассчитывать ИК излучение верхней атмосферы в широком спектральном диапазоне.

Воздействие радиоволны с частотой $\omega \gg \nu$ (где ν — частота столкновений электрона с частицами газа) на ионосферные электроны описывается с помощью метода "эффективного поля" /3, 4/. В этом методе переменное (во времени) электрическое поле радиоволны заменяется на стационарное "эффективное поле".

Расчет был выполнен для ночных условий для слабого полярного сияния (поток энергии выпадающих из магнитосферы электронов $\sim 3 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$ с максвелловским распределением их по энергии и с характеристической энергией в этом распределении 3 кэВ) с использованием характеристик станций высотного зондирования EISCAT вблизи г. Тромсе, Норвегия (частота 4 МГц, напряженность поля на высоте 70 км 1,4 В/м, ширина диаграммы направленности 15°). Найдено, что максимум объемной интенсивности ИК излучения вследствие прохождения радиоволны расположен на высоте ~ 90 км, соответствующей максимуму электронной температуры ($T_e \sim 2000 \text{ К}$, $N_e \sim 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$). Характерный горизонтальный размер излучающего объема атмосферы равен приблизительно 20 км, а вертикальный — 5 км. Указанная область атмосферы была выбрана в качестве источника ИК излучения при анализе возможности его наблюдения с искусственного спутника Земли. Расположение этой области по высоте и высотное распределение интенсивности ИК излучения в ней зависят от геофизических условий в момент прохождения радиоволны.

На рис. 1 показана полученная зависимость собственной (за счет возбуждения ВЧ полем) яркости источника (кривая 1) от угла между направлением визирования и вертикалью. Максимум яркости имеет место при наблюдении в надир. Падение яркости с увеличением угла обусловлено ростом поглощения излучения атмосферой, геометрией источника и неравномерным распределением плотности его энергии по высоте. Средняя по углу наблюдения яркость источника, как показала расчет, составляет $3 \cdot 10^{-9}$ Вт/см²ср.

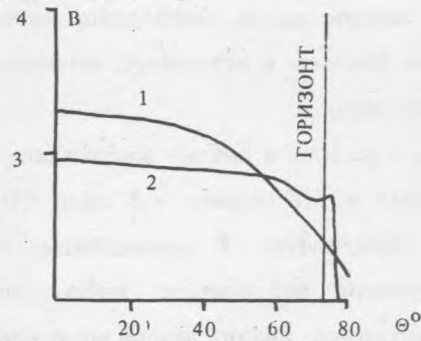


Рис. 1. Зависимость яркости источника и яркости фона B от угла Θ между направлением визирования и вертикалью: 1 — яркость источника, 10^{-9} Вт/см²ср; 2 — яркость фона, 10^{-6} Вт/см²ср.

Одним из вариантов измерительного прибора является фильтровый ИК радиометр. Для выбора приемника излучения в ИК радиометре воспользуемся следующим соотношением, связывающим минимально обнаружимую мощность светового потока, падающего на приемник, с яркостью источника B_s и параметрами оптической схемы радиометра:

$$S_d \Delta f / D^* = k B_s \eta \Omega S_l,$$

где D^* , S_d — обнаружительная способность и площадь приемника; Δf — полоса пропускания приемно-усилительного тракта; k — коэффициент пропускания радиометра; Ω — телесный угол поля зрения, зависящий от размеров источника и его удаленности от точки наблюдения; S_l — площадь фокусирующей линзы радиометра; η — относительная точность измерения яркости источника, ограниченная шумами ИК приемника.

Подставляя в это соотношение реальные значения входящих в него величин $B_s = 3 \cdot 10^{-9}$ Вт/см²ср; $S_d = 0,25$ см²; $k = 0,3$; $\Omega S_l = 6 \cdot 10^{-2}$ см²ср (при относительном отверстии линзы 1:2), получим значение $D^* = 5 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹Гц^{1/2} см, обеспечивающее измерение яркости источника с точностью 20%. Требуемыми характеристиками обладают фоторезисторы из антимонида индия, охлаждаемые до температуры 77 К и имеющие максимум чувствительности в диапазоне длин волн 4—5 мкм [5].

Для практической реализации указанной точности измерений важным является вопрос о соотношении яркостей исследуемого источника и фонового излучения атмосферы. Нами была рассчитана интегральная по области спектральной чувствительности радиометра яркость излучения фона при различных направлениях визирования из космоса (рис. 1, кривая 2). Расчеты проводились по известной программе LOWTRAN-5 /6/. Как показывают результаты расчетов, уровень фона существенно превышает сигнал от источника, поэтому выделение искомого малого сигнала возможно лишь при использовании дифференциального метода измерений, в котором сигнал от фона в направлении, близком к источнику, вычитается из сигнала в направлении на источник в каждом периоде модуляции.

Таким образом, проведенные расчеты и анализ показывают, что возмущенная ВЧ радиоволной область ионосферы, излучающая в ИК полосе $4,3 \text{ мкм CO}_2$, может быть зарегистрирована космической бортовой ИК аппаратурой. В дальнейшем перед постановкой эксперимента необходима оптимизация условий наблюдения: выбор ширины диапазона спектральной чувствительности и углов визирования, анализ задачи на основе модельных расчетов для других геометрий наблюдения и для других геофизических ситуаций в ионосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н е п г и с е н К. et al. Annales Geophysical, 2, 73 (1984).
2. Гордиец Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. Труды ФИАН, 105, 7 (1978).
3. Иванов Ю. А., Полак Л. С. В сб. Химия плазмы, вып. 7, М., Атомиздат, 1975, с. 161.
4. Гордиец Б. Ф., Степанович А. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, №7, 8, 47 (1992).
5. Криксунов А. З. Справочник по основам инфракрасной техники, Сов. радио, М., 1978.
6. К н е и з у с F. X. et al. AFGL-TR-80-0067, Feb. 1980, Air Force Geophysics Laboratory, Bedford, Ma.

Поступила в редакцию 3 июня 1992 г.