

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИНДИКАЦИИ РАДИОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ АММИАЧНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

А. П. Наумов, В. М. Плечков, В. П. Борин,
М. Б. Зиничева, В. А. Порфирьев, В. Н. Фокин

Одной из важнейших задач охраны окружающей среды является осуществление оперативного и эффективного контроля за чистотой земной атмосферы. С развитием индустриализации может происходить увеличение концентрации примесей, поступающих в нижние слои атмосферы. Для борьбы с загрязнением целесообразно использовать широкий комплекс мероприятий, и в этом отношении особое значение будут иметь как объективная оценка степени загрязнения воздушного бассейна, так и разработка соответствующих метеорологических методов исследований, связанных с анализом распространения выбрасываемых газов в атмосфере [1, 2]. Радиофизические методы, вместе с другими дистанционными методами [3], могут быть использованы в качестве базиса при рациональной организации службы систематического контроля за состоянием и изменениями окружающей среды, которые вызваны воздействием человека. На первом этапе решения подобных задач важно оценить количественное содержание примесей, которые могут быть обнаружены радиофизическими методами.

В данном сообщении рассматриваются возможности индикации по собственному радиоизлучению атмосферы в СВЧ диапазоне повышенного содержания аммиака, имеющего промышленное происхождение. Хотя аммиак не относится к числу наиболее показательных в санитарном отношении ингредиентов, оперативное определение содержания его в атмосфере представляется весьма актуальным [1, 3]. Упомянутая задача сводится к задаче выделения уярчения, обусловленного наличием NH_3 , на фоне собственного радиоизлучения чистой атмосферы. Наибольшее возрастание яркостной температуры $T_{\text{я}}$ атмосферы из-за влияния NH_3 следует ожидать в области инверсионного резонанса аммиака, центрированного к $\lambda \sim 1,25 \text{ см}$ (частоты $\nu \sim 24 \div 25 \text{ ГГц}$) [4].

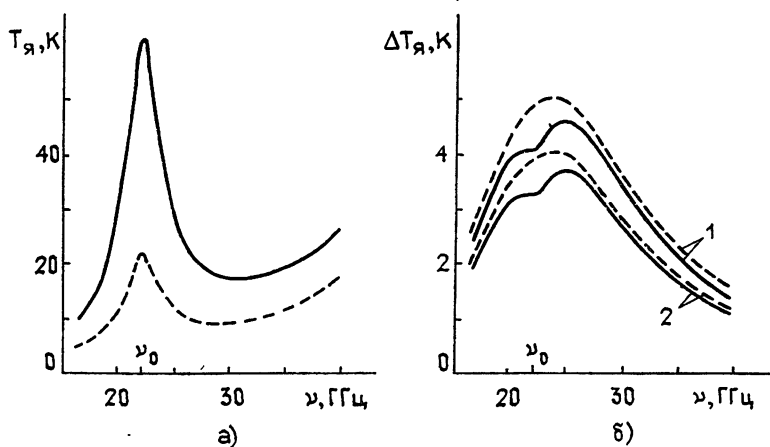


Рис. 1. а) Значения яркостной температуры чистой безоблачной атмосферы в зенитном направлении в области частот $\nu = 16 \div 40 \text{ ГГц}$; резонансная частота вращательного перехода H_2O $\nu_0 = 22,235 \text{ ГГц}$. Сплошная кривая — летняя модель атмосферы, пунктир — зимняя модель.

б) Величины уярчения радиоизлучения земной атмосферы в области $\nu = 16 \div 40 \text{ ГГц}$ из-за присутствия аммиака в слое толщиной 100 м : 1 — $f_{\text{NH}_3} = 100 \text{ мг/м}^3$, 2 — $f_{\text{NH}_3} = 80 \text{ мг/м}^3$. Сплошная кривая — лето; пунктир — зима.

На рис. 1 представлены результаты расчетов яркостной температуры $T_{\text{я}}$ чистой атмосферы (фон излучения) и уярчения $\Delta T_{\text{я}}$ относительно чистой атмосферы в зависимости от объемного содержания f_{NH_3} для аммиачного слоя толщиной $\Delta H = 100 \text{ м}$

с высотой нижней границы, также равной $H_0 = 100 \text{ м}^*$. Подобные параметры слоя близки к реальным характеристикам выбросов [1]. Из рисунка видно, что уярчение (температура аммиака считается равной температуре атмосферы) может достигать $\sim 3,5\text{--}5 \text{ К}$ в зенитном направлении при интегральном содержании NH_3 в атмосфере $\bar{W} \approx 8 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3} \text{ г/см}^2$, что для принятой толщины слоя загрязнения соответствует средней объемной концентрации $f_{\text{NH}_3} \approx 80 \div 100 \text{ мг/м}^3$. При ветровом сдвиге выбросов, когда происходит увеличение оптической толщины слоя, содержащего аммиак, уярчение $\Delta T_{\text{я}}$ может достигать $\sim 2 \text{ К}$ для $f_{\text{NH}_3} \approx 10 \text{ мг/м}^3$ при зенитном угле визирования $\theta = 85^\circ$. Указанные значения f_{NH_3} в 50 и более раз превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) $f_{\text{NH}_3}^{\text{ПДК}} = 0,2 \text{ мг/м}^3$ в атмосфере [1]. Следует, однако, отметить, что в реальных условиях не исключаются кратковременные ситуации, когда концентрация f_{NH_3} может превышать $f_{\text{NH}_3}^{\text{ПДК}}$ более чем в 100 раз. Полученные выше контрасты яркостных температур $\Delta T_{\text{я}}$ могут быть измерены радиометрическим методом, и этот метод, таким образом, может быть использован для индикации аномально высоких содержаний аммиака в атмосфере, например, при азимутальном сканировании. Теоретические исследования возможностей дистанционной индикации сернистого газа SO_2 по особенностям радиоизлучения атмосферы на резонансной частоте $\nu = 53,53 \text{ Гц}$, расположенной на склоне спин-вращательной полосы поглощения O_2 , и результаты лабораторной проверки сделанных выводов приведены в [7].

В природных условиях уярчение радиоизлучения атмосферы из-за присутствия аммиака может сопровождаться факторами, усложняющими интерпретацию физических результатов. К таким факторам относятся: вариации полной массы водяного пара в атмосфере, которые определяют вариации фона излучения, общее повышение температуры атмосферы в районе выбросов из-за промышленных термических воздействий (см., например, табл. 9.1 в [1]), а также различная степень увлажненности аммиачных выбросов и разница в их температуре, связанные с характером выбросов (технологические и вентиляционные выбросы). Все перечисленные факторы требуют количественных оценок при интерпретации радиометрических данных по определению загрязнения атмосферы.

Экспериментальная проверка теоретических выводов в данной работе осуществлялась путем измерения атмосферного радиоизлучения в основном под зенитным углом $\theta = 85^\circ$ вблизи аммиачного производства с пространственно-локализованными (организованными) выбросами NH_3 . Радиометрические измерения проводились летом 1978 г. с помощью радиометра супергетеродинного типа, который описан в [8] и который был модернизирован для решения рассматриваемой задачи. Чувствительность радиометра по антенной температуре на рабочей длине волны $\lambda = 1,25 \text{ см}$ составляла $\delta T_{\text{p}} \approx 0,5 \text{ К}$ при постоянной времени наблюдения $\tau = 4 \text{ с}$. Были приняты дополнительные меры для подавления боковых и зад-

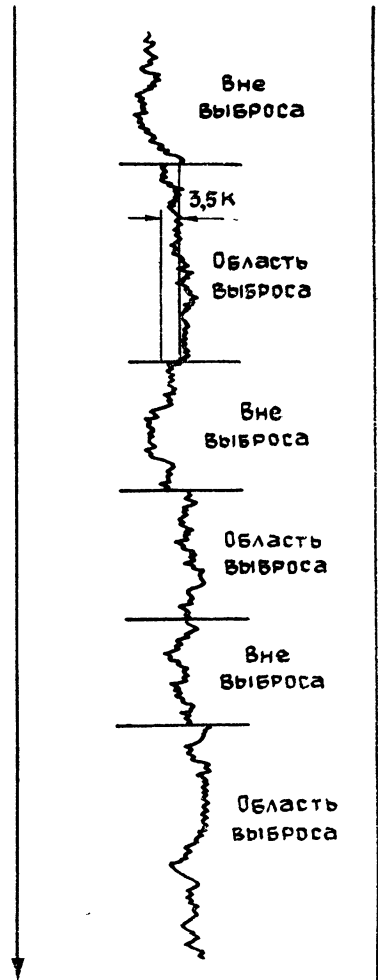


Рис. 2. Пример вариаций яркостной температуры на длине волны $\lambda = 1,25 \text{ см}$ при зондировании под зенитным углом $\theta = 85^\circ$ в районе аммиачных выбросов.

* Расчеты яркостных температур атмосферы выполнялись по тем же формулам, что и в [6]. Коэффициент поглощения NH_3 вычислялся по квантово-механической формуле (1) в [6] с учетом поправок на химический состав земной атмосферы. Заметим, что в написании формулы (1) в [6] содержится опечатка: в знаменатель дроби фактор

$$\left(\frac{\sigma_{\text{H}_2-\text{NH}_3}}{\sigma_{\text{NH}_3-\text{NH}_3}} f_{\text{H}_2} + f_{\text{NH}_3} \right) \text{ входит в квадрат.}$$

них лепестков приемной антенны. Диаграмма направленности антенны по уровню половинной мощности равнялась $80'$ Калибровка приемной аппаратуры осуществлялась по собственному излучению чистой безоблачной атмосферы [9]. Общая точность измерения уярчения в среднем, $\Delta T_{\text{я}}$, атмосферного радиоизлучения при многократном сканировании областей выбросов и чистой атмосферы, которая определяет чувствительность радиометрического метода, оценивается в $\sim 0,25$ К, что соответствует относительному содержанию аммиака в ~ 30 ПДК при толщине слоя загрязнения $\Delta H \approx 100$ м или ~ 6 ПДК при $\Delta H \approx 500$ м*. Один из примеров записи радиоизлучения атмосферы для ряда азимутальных сканирований в районе аммиачных выбросов приведен на рис. 2.

Радиометрические измерения выполнялись в сроки, близкие к срокам запусков шаров-зондов Гидрометеослужбой, и данные аэрологического зондирования атмосферы учитывались при оценке влияния полной массы водяного пара на результаты измерений. В работе оценивалась роль и других факторов, которые перечислены выше и которые усложняют интерпретацию результатов. При этом оказалось, что насыщение до 90% влагой выбросов аммиака может увеличивать величину $\Delta T_{\text{я}}$ для $\theta = 85^\circ$ от $\sim 0,1$ до ~ 3 К, а нагрев выбросов на несколько десятков градусов относительно общего повышения температуры в зоне термического воздействия уменьшает значения $\Delta T_{\text{я}}$ на $\sim 0,1 \div 0,6$ К**. Суммарные поправки $\Delta T_{\text{я}}^{\text{M}}$ при одновременном влиянии обоих перечисленных факторов характеризуют степень неопределенности количественной интерпретации результатов измерений.

В процессе работы было определено, что уярчение атмосферного радиоизлучения при $\theta = 85^\circ$ вблизи устья выбрасывающих труб иногда достигало $\sim 2 \div 4$ К. С учетом поправок $\Delta T_{\text{я}}^{\text{M}}$ на упомянутые выше «мешающие» факторы, этим значениям $\Delta T_{\text{я}}$ соответствуют эффекты $\sim 1,6 \div 2,7$ К, которые отождествлялись нами с влиянием аммиака на величины уярчения. Проведенные радиометрические измерения и выполненная интерпретация результатов позволили оценить реализующиеся повышенные содержания аммиака на луче зрения***, а также характер рассеивания примеси в атмосфере. В процессе исследований подтверждено, что масштаб локализации повышенных содержаний NH_3 был всегда существенно меньше размеров санитарно-защитных зон, разделяющих предприятие и жилые массивы

В заключение кратко сопоставим полученные результаты с данными по определению аммиачного загрязнения атмосферы лазерными дистанционными методами. При двухчастотных измерениях поглощения на приземной трассе ~ 570 м с помощью CO_2 -лазера в [10] достигнута чувствительность $\sim 0,5$ ПДК NH_3 , что превышает указанную выше чувствительность радиометрического метода. Однако практическое применение более чувствительных лазерных методов сопряжено с определенными трудностями измерений при низкой дальности видимости, которая нередко может иметь место в зонах промышленного загрязнения атмосферы. Отмеченного недостатка практически лишен рассматриваемый радиометрический метод, и это обстоятельство должно приниматься во внимание при выборе условий контроля за атмосферным загрязнением различными дистанционными методами.

Полученные оценки уярчения $\Delta T_{\text{я}}$ свидетельствуют о необходимости учета рассмотренных эффектов при радиометрическом исследовании влагосодержания земной атмосферы [8, 11] и в характеристиках распространения радиоволн $\nu = 20 \div 40$ Гц вблизи источников возможного выброса аммиака.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Е. Берлянд, Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы, Гидрометеоиздат, Л., 1975.
2. Динамическая метеорология, под ред. Д. Л. Лайхтмана, Гидрометеоиздат, Л., 1976.
3. И. М. Назаров, Ш. Д. Фридман, Метеорология и гидрология, № 4, 45 (1978).
4. Ч. Таунс, А. Шавлов, Радиоспектроскопия, ИЛ, М., 1959.
5. К. П. Гайкович, А. П. Наумов, Радиотехника и электроника, 24, № 1, 168 (1979).
6. А. Д. Кузьмин, А. П. Наумов, Т. В. Смирнова, Астрон. вестник, 6, № 1, 13 (1972).
7. T. Hida ka, Proc IEEE, 65, № 7, 1095 (1977).

* Приведение чувствительности радиометрического метода к толщине слоя загрязнения $\Delta H \sim 500$ м осуществлено для удобства последующего сравнения с возможностями лазерного метода.

** Влияние «мешающих» факторов на характер радиоизлучения атмосферы заметно зависит от количества влаги, содержащейся в приземном слое.

*** Неопределенность в оценках количества аммиака из-за приближительного значения величины $\Delta T_{\text{я}}^{\text{M}}$ оказывается не более $\sim 1,5$ раз.

8. В. М. Плечков, Изв. АН СССР, серия Физика атмосферы и океана, 4, № 2, 182 (1968).
 9. А. Г. Кисляков, Изв. вузов — Радиофизика, 9, № 3, 451 (1966).
 10. В. М. Артемов, Е. М. Артемов, Н. Д. Балясный, А. В. Горелик, И. М. Назаров, Л. И. Соловьева, Ш. Д. Фридман, В. И. Черненький, Метеорология и гидрология, № 7, 103 (1977).
 11. А. П. Наумов, Изв. АН СССР, серия Физика атмосферы и океана, 4, № 2, 170 (1968).

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
14 июня 1979 г.

УДК 538.3

О СЛЕДУЮЩИХ ИЗ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ НЕРАВЕНСТВАХ ДЛЯ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

В. П. Казанцев

Тензор поляризуемости $\hat{\alpha}$ связывает линейным соотношением вектор дипольного момента частицы, находящейся в однородном электрическом поле, с вектором напряженности этого поля E_0 [1]:

$$p = \hat{\alpha} E_0. \quad (1)$$

В общем случае $\hat{\alpha}$ — тензор второго ранга, расчет которого требует решения соответствующей задачи электростатики и для тела произвольной формы очень сложен. Точное значение тензора поляризуемости известно лишь для тел правильной формы: шара, цилиндра, эллипсоида. Однако на практике, например в задачах о прохождении электромагнитных волн через среду мелких диэлектрических частиц, таких, как частицы пыли, снежинки и т. д., необходимо уметь оценивать значения их поляризуемостей. Ясно, что из-за случайной ориентации частиц в макроскопические характеристики среды должна входить средняя по всем направлениям поляризуемость, величина которой равна третьей части следа тензора $\hat{\alpha}$. Будем обозначать ее буквой α .

Для оценки снизу величины α для некоторой частицы, занимающей область пространства V , воспользуемся тем фактом, что решение уравнения

$$\operatorname{rot} \left[\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} (E_0 + \operatorname{rot} A) \right] = 0 \quad (2)$$

относительно векторного потенциала A , связанного с вектором плотности поляризации $P(\mathbf{r})$ объема частицы соотношением

$$A(\mathbf{r}) = \int_V \frac{P(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV', \quad (3)$$

дает максимум функционалу

$$W(A) = \int \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \left[(\varepsilon(\mathbf{r}) - 1) E_0 - \frac{1}{2} \operatorname{rot} A \right] \operatorname{rot} A dV. \quad (4)$$

Интегрирование в формуле (3) проводится по области пространства, занимаемого частицей, а в (4) — по всему пространству. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\mathbf{r})$ в объеме частицы принимает постоянное значение $\varepsilon > 1$, а вне его равна единице. В том, что $W(A)$ максимально для A , являющегося решением уравнения (2) в классе векторных потенциалов, представимых в виде (3), можно убедиться, если заметить, что правая часть непосредственно проверяемого тождества

$$W(A) - W(A_0) = \int \left[E_0 - \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} (E_0 + \operatorname{rot} A_0) \right] \operatorname{rot} A_1 dV - \frac{1}{2} \int \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} (\operatorname{rot} A_1)^2 dV, \quad (5)$$