

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ В ИОНОСФЕРЕ

В. Г. Курт

В последнее время наши представления об основных физических характеристиках верхней атмосферы претерпели существенные изменения. Данные по распределению плотности нейтральной компоненты свидетельствуют о наличии плотности приблизительно в 10 раз большей, чем предполагалось еще два года назад. В основном эти результаты были получены благодаря искусственным спутникам Земли [1,2].

Однако определение плотности как ионизованной, так и нейтральной составляющих нуждается в экспериментальной проверке другими независимыми методами. Желательно, чтобы такой метод позволял в единичном эксперименте получать основные характеристики верхней атмосферы, т. е. ее плотность и температуру. Такой эксперимент был предложен И. С. Шкловским. Идея эксперимента чрезвычайно проста. На нужной нам высоте в утренних или вечерних сумерках производится выброс паров натрия с высотной ракеты\*. Облако, освещенное лучами Солнца, светится вследствие резонансной флюоресценции, что позволяет наблюдать его с поверхности Земли. В нашем случае выброс паров производился на высоте 430 км над поверхностью Земли. Высота земной тени во время эксперимента равнялась 300 км. Наблюдения продолжались в течение 15 мин, причем было получено около 50 фотографий облака. За это время облако достигло размеров в несколько сотен километров. Так как каждый атом натрия испытывает множество соударений с атмосферными атомами, то через короткий промежуток времени после выброса паров натрия (можно показать, что это время равно 100 сек) в облаке устанавливается диффузионное распределение.

---

\* Подобная методика применялась ранее в США для определения скорости ветра и других параметров атмосферы на высотах порядка 100 км. Задача определения плотности атмосферы в этих экспериментах не ставилась.

Следует, однако, иметь в виду, что диффузия натрия в атмосфере происходит в неоднородной среде при наличии силы тяжести. В этом случае уравнение диффузии запишется в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \operatorname{div} (D \operatorname{grad} u) + \operatorname{div} (V_z u) - C, \quad (1)$$

где  $u$  — концентрация атомов натрия,  $D$  — коэффициент диффузии,  $V_z$  — скорость дрейфа атомов натрия в поле тяжести,  $C$  — разность между числом атомов натрия, ионизованных ультрафиолетовым излучением Солнца, и числом вновь поступающих атомов. В нашем случае  $C$  можно положить равным нулю, так как время жизни атомов натрия в поле солнечной радиации равно нескольким часам.

Уравнение (1) решалось нами при двух различных начальных условиях: 1) диффузия начинается с момента  $t = 0$ , когда распределение частиц имеет вид:

$$u = Q \delta(z) \frac{\delta(r)}{r},$$

где  $Q$  — общее число атомов натрия в облаке; 2) диффузия начинается с момента  $t = t_0$ , когда атомы натрия равномерно заполняют сферу радиуса  $R_0$ .

Вначале упростим уравнение, положив в нем  $V_z = 0$ ,  $D = \operatorname{const}$ . Тогда решение в первом случае имеет весьма простой вид:

$$u = \frac{Q}{4\sqrt{\pi}(Dt)^{3/2}} e^{-R^2/4Dt}. \quad (2)$$

Сравнивая выражение (2) с найденной из эксперимента зависимостью  $u$  от  $R$ , можно получить значение коэффициента диффузии  $D$ . Последний, в свою очередь, связан с плотностью атмосферы  $n$ :

$$D = \frac{3\pi}{32} \frac{1}{nQ_d} \sqrt{\frac{8kT}{\pi} \left( \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)}, \quad (3)$$

где  $Q_d$  — эффективное сечение диффузии,  $T$  — температура атмосферных атомов,  $M_1, M_2$  — масса атомов атмосферы и натрия.

Подставляя в (3) численные значения для высоты 430 км и полагая, что атмосфера на этой высоте состоит из атомарного кислорода (на что сейчас имеются все указания), найдем для концентрации атмосферных атомов в качестве первого приближения величину  $0,8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ .

Далее мы улучшим этот результат, отказавшись от точечного начального условия. При этом решением для нашей центрально-симметричной задачи будет<sup>\*</sup>

$$u(0, t) = u(0, 0) \left[ \psi \left( \frac{R_0}{\sqrt{2Dt}} \right) - \frac{R_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-R_0^2/4Dt} \right]. \quad (4)$$

Сравнивая найденную из опыта концентрацию в центре облака с выражением (4), найдем, что наилучшее согласие достигается при  $n = 1,8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Подробное описание методики нахождения концентрации атомов натрия содержится в [3].

Теперь оценим влияние силы тяжести и градиента плотности атмосферы. Ограничимся для простоты одномерным случаем с точечными начальными условиями. Уравнение (1) будет иметь решение

$$u(z, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi D_0 t}} e^{-(z + Vz t)^2/4D_0 t} \quad (5)$$

для случая однородной атмосферы при наличии силы тяжести, т. е. при  $D = D_0 = \operatorname{const}$  и  $V_z = \operatorname{const} \neq 0$ . В (5)  $V_z = \lambda g/v_t$ ,  $\lambda$  — средняя длина свободного пробега частицы,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $v_t$  — термическая скорость. Для случая неоднородной атмосферы с постоянной температурой и без учета силы тяжести, т. е. при  $D = D_0 e^{\sigma z}$ ,  $V_z = 0$ , решение (1) имеет вид

$$u = \frac{\alpha Q}{D_0 \alpha^2 t} \exp \left( - \left( \frac{\sigma z}{2} + \frac{1 + e^{-\alpha z}}{D_0 \alpha^2 t} \right) \right) I_1 \left( \frac{2e^{-\alpha z}}{D_0 \alpha^2 t} \right), \quad (6)$$

\* Здесь  $\psi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$  — интеграл вероятности.

где  $\alpha$  — величина, обратная высоте однородной атмосферы,  $D_0$  — коэффициент диффузии для высоты, на которой происходит выброс паров натрия,  $I_1$  — функция Бесселя мнимого аргумента. В первом случае мы имеем равномерное опускание облака вниз со скоростью  $V_z$ , которая для нашего эксперимента равна  $3 \cdot 10^3$  см сек<sup>-1</sup>. Форма облака при этом сохраняется такой же, как и при отсутствии силы тяжести.

Во втором случае облако деформируется, а область максимальной концентрации смещается вниз со все уменьшающейся скоростью. Положение точки максимальной концентрации находится из уравнения:

$$I_1 \left( \frac{2e^{-\alpha z}}{D_0 \alpha^2 t} \right) e^{\frac{\alpha z}{2}} = I_0 \left( \frac{2e^{-\alpha z}}{D_0 \alpha^2 t} \right), \quad (7)$$

где  $I_1$  и  $I_0$  — функции Бесселя мнимого аргумента.

На рис. 1 представлена зависимость величины опускания облака от времени в безразмерных координатах.

Рис. 1. Смещение области максимальной концентрации в безразмерных координатах  $x = \alpha z$ ,  $\tau = D_0 \alpha^2 t$ .

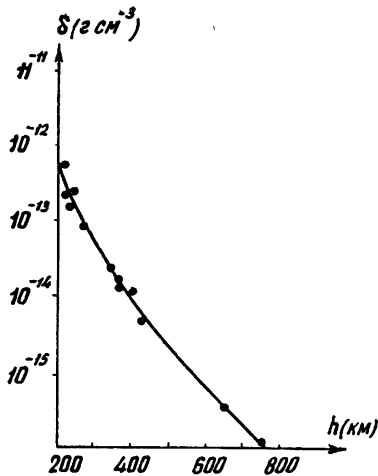
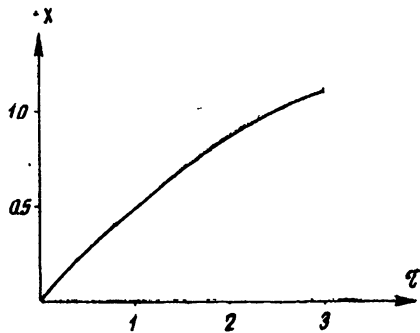


Рис. 2. Распределение плотности нейтральных частиц  $\delta$  по высоте  $h$  в области ионосферы.

Действие силы тяжести и влияние градиента плотности атмосферы приводит к смещению эффективного центра натриевого облака менее чем на 50 км за 1000 сек, чем вполне можно пренебречь, особенно, если наблюдения продолжаются около 500 сек.

Описанный выше метод применим для ограниченного интервала высот. Его нижняя граница определяется временем наблюдений, так Солнце в период наблюдений находится слишком близко к горизонту. Верхняя граница определяется тем, что облако рассеивается быстрее, чем успевает начаться диффузия. Метод применим, по-видимому, в интервале высот от 250 до 600 км, т. е. захватывает почти всю область ионосферы. На рис. 2 приведены последние данные определения плотности атмосферы выше 200 км.

Наконец, отметим, что метод натриевого облака позволяет определять и температуру атмосферы по доплеровской ширине эмиссионных линий. В ближайшее время такие наблюдения будут проведены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Л. Альперт, Ф. Ф. Доброхотов, Э. Ф. Чудесенко, В. С. Шапиро, ДАН, СССР 20, 747 (1958).
2. В. В. Михневич, Искусственные спутники Земли, 2, 26, 1958.
3. И. С. Шкловский, В. Г. Курт, Искусственные спутники Земли, 3, 66, 1959.