

А. Г. АМЕЛИН

ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ТУМАНОВ

(Представлено академиком С. И. Вольфовичем 9 I 1951)

Правильное толкование процесса образования радиационных туманов имеет большое практическое значение, так как этот туман является в СССР наиболее распространенным. Между тем, до сего времени отсутствуют достаточно надежные методы расчета радиационных туманов.

В настоящее время считается общепризнанным, что образование радиационных туманов вызывается охлаждением приземного слоя воздуха вследствие снижения температуры поверхности земли в ночное время за счет радиации. Лучеиспускание самого воздуха мало, и его можно не учитывать^(1,2).

Ранее было показано⁽³⁾, что конденсация пара в объеме и образование тумана наступает в том случае, когда возникающее пересыщение пара превышает критическую величину:

$$S >_* S_{кр}, \quad (1)$$

где S — возникающее пересыщение пара,

$$S = p/p_n; \quad (2)$$

p — давление пара в воздухе; p_n — давление насыщенного пара

$$p_n = e^{C-E/T}; \quad (3)$$

T — абсолютная температура воздуха; C и E — коэффициенты; $S_{кр}$ — критическое пересыщение пара.

В атмосферном воздухе присутствуют взвешенные частицы размером от 10^{-4} до 10^{-6} см. Эти размеры настолько велики, что, в соответствии с уравнением Томсона, конденсация пара наступает при очень малом пересыщении. Поэтому для атмосферного воздуха можно принять $S_{кр} = 1$. Это также подтверждается данными метеорологии⁽⁴⁾.

Образование радиационных туманов можно представить следующим образом. В течение дня температура поверхности земли повышается и держится выше температуры воздуха. После захода солнца температура земли снижается в результате излучения тепла, и когда она становится ниже температуры воздуха, устанавливается теплопереход от приземного слоя воздуха к поверхности земли.

Давление пара воды в воздухе вначале не изменяется, но когда температура поверхности земли становится ниже точки росы, начинается процесс конденсации пара воды на поверхности земли.

Следовательно, в течение ночи в приземном слое воздуха протекают одновременно два процесса — передача тепла от воздуха поверхности земли и конденсация пара воды на поверхности земли, причем

соотношение скоростей этих процессов таково, что пересыщение пара повышается, и если оно достигает единицы, наступает конденсация пара в объеме и образование тумана (3).

Для предсказания возможности образования радиационного тумана и времени его появления необходимо установить изменение пересыщения пара по высоте приземного слоя воздуха и по времени, т. е. решить уравнение (составленное на основании (2) и (3))

$$S(x, \tau) = \frac{p(x, \tau)}{e^{C - E/T(x, \tau)}}, \quad (4)$$

где S — пересыщение пара, p — давление пара воды в воздухе, τ — время, x — расстояние от поверхности земли.

По уравнению (4) необходимо определить x и τ , при которых максимальное пересыщение пара достигает единицы.

Радиационный туман обычно образуется к концу безоблачной ночи в местах, где скорость воздуха мала: в оврагах, на полянках и т. д. Если в этом случае роль турбулентной диффузии теплопроводности не учитывать, то процесс передачи массы (конденсация пара) и процесс передачи тепла в приземном воздухе могут быть отражены уравнениями

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где D — коэффициент диффузии и a — коэффициент теплопроводности воздуха.

Решение этих уравнений в данном случае затрудняется тем, что температура поверхности земли снижается во времени, а давление пара воды в воздухе вначале не изменяется (до тех пор пока температура земли не достигнет точки росы), а затем уменьшается в соответствии со скоростью конденсации пара на поверхности земли, температура которой понижается.

Учитывая сказанное, нами (совместно с А. А. Абрамовым) сделаны допущения, которые позволяют получить приближенное решение уравнения (4) и, таким образом, составить представление о влиянии различных факторов на начало образования радиационного тумана.

Понижение температуры поверхности земли в течение ночи в первом приближении может быть принято по прямолинейному закону

$$T(0, \tau) = T(0, 0) - k\tau, \quad (7)$$

где $T(0, 0)$ — абсолютная температура поверхности земли при заходе солнца; $T(0, \tau)$ — абсолютная температура поверхности земли по истечении времени τ ; k — коэффициент.

Для решения уравнения (5) должны быть приняты следующие граничные условия

$$T(0, \tau) = T_0 \quad \text{при } \tau \leq 0,$$

$$T(0, \tau) = T_0 - k\tau \quad \text{при } \tau > 0,$$

где T_0 — температура поверхности земли и приземного слоя воздуха в начале процесса ($\tau=0$).

Тогда, по известной формуле (5), получаем

$$T(x, \tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty f\left(\tau - \frac{x^2}{4a\tau^2}\right) e^{-\tau^2} d\tau \quad (8)$$

где

$$f\left(\tau - \frac{x^2}{4a\xi^2}\right) = f(u) = T_0 \quad \text{при } u \leq 0;$$

$$f(u) = T_0 - ku \quad \text{при } u > 0;$$

ξ — вспомогательная функция.

Решение уравнения (8) имеет вид

$$T(x, \tau) = T_0 - k\tau \left\{ \left(1 + \frac{z^2}{2}\right) \left[1 + \Phi\left(\frac{z}{2}\right)\right] - \frac{z}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2/4} \right\}, \quad (9)$$

где $\Phi(z)$ — трансцендентная функция Крампа,

$$z = \frac{x}{\sqrt{a\tau}}. \quad (10)$$

Для определения давления пара воды в приземном воздухе в течение ночи принимаем, что на небольшом участке времени давление насыщенного пара воды у поверхности земли изменяется прямолинейно. Тогда после некоторого промежутка времени τ_0 , когда температура поверхности земли достигает точки росы, решение уравнения (6) будет иметь такой же вид, как уравнение (9):

$$p = p_0 - n(\tau - \tau_0) \left\{ \left(1 - \frac{y^2}{2}\right) \left[1 - \Phi\left(\frac{y}{2}\right)\right] - \frac{y}{\sqrt{\pi}} e^{-y^2/4} \right\}, \quad (11)$$

где

$$y = \frac{x}{\sqrt{D(\tau - \tau_0)}}; \quad (12)$$

D — коэффициент диффузии, τ_0 — момент времени, после которого начинается конденсация пара на поверхности земли, n — некоторый коэффициент.

Такое допущение позволяет получить приближенное решение уравнения (6). Для повышения точности весь участок времени целесообразно разбить на несколько промежуточных значений и в каждом из них изменение давления насыщенного пара воды у поверхности земли в зависимости от времени принимать по прямолинейному закону.

В табл. 1 приведены результаты примерного расчета для следующих условий: температура поверхности земли и воздуха при заходе солнца $t_1 = 15^\circ$, давление пара воды в воздухе при заходе солнца $p_1 = 11,5$ мм рт. ст., относительная влажность воздуха 90%, температура поверхности земли по истечении 10 час. $t_2 = 5^\circ$, коэффициент диффузии пара воды в воздухе $D = 0,0846$ м²/час, коэффициент теплопроводности $a = 0,0727$ м²/час.

Из данных табл. 1 видно, что на высоте 0,15 м через 10 час. возникающее пересыщение пара превышает единицу и, следовательно, на этой высоте будет иметь место образование тумана. Однако из данных

Таблица 1

Пересыщение пара воды в приземном слое воздуха по истечении 10 час. после захода солнца

Высота x в м	Т-ра воздуха в $^\circ$	Давление пара воды в воз- духе в мм рт. ст.	Пересыщение пара
0	278,1	6,54	1
0,05	278,76	6,84	0,99
0,1	279,36	7,14	1,0
0,15	279,93	7,44	1,001
0,2	280,45	7,69	0,99
0,3	281,52	8,15	0,98

опыта известно ⁽¹⁾, что для принятых условий образование тумана должно наступить раньше и на большей высоте. Расхождение можно объяснить тем, что в приведенных рассуждениях критическое пересыщение принято равным единице, в действительности оно ниже, так как в воздухе всегда содержатся активные центры конденсации. Кроме того, в расчете не учтена турбулентная диффузия и теплопроводность, которые всегда имеют место в атмосфере и значительно увеличивают общие коэффициенты диффузии и температуропроводности. Увеличение этих коэффициентов, как это следует из уравнений (10) и (12), приводит к изменению масштаба для x , т. е. при прочих равных условиях к увеличению x , причем изменение в масштабе происходит в степени 0,5 от увеличения общего коэффициента диффузии и температуропроводности.

Научный институт по удобрениям
и инсектофунггицидам
им. Я. В. Самойлова

Поступило
1 II 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ И. Г. Лютерштейн и А. Ф. Чудновский, Тр. НИУ, сер. 1, вып. 28 (1946). ² А. А. Дородницын, ДАН, 39, № 5 (1941). ³ А. Г. Амелин, ЖТФ, № 12, 1409 (1946); Коллоидн. журн., № 10, № 8, 169 (1948); ЖТФ, 19, № 10, 1136 (1949). ⁴ Б. В. Кирюхин, Тр. НИУ, сер. 1, в. 28 (1946). ⁵ А. Вебстер и Г. Сеге, Дифференциальные уравнения в частных производных математической физики, М.—Л., 1933.