Плоское дно кучевых облаков

Задача 5. [ИОШ 2023/24, отборочный этап, 11 класс, задача 5] Летом часто наблюдается следующая структура кучевых облаков: все облака имеют плоскую нижнюю (обращённую к земле) поверхность (причём находящуюся на одной высоте у разных облаков) и «клубящуюся» верхнюю поверхность (см. фото). Объясните такую структуру облаков, опираясь на законы физики.



▲ **Решение.** **Что происходит.** Солнце греет землю, земля — нижний слой воздуха. Тёплый воздух легче окружающего и всплывает пузырями (закон Архимеда). Поднимаясь, он попадает туда, где давление меньше, расширяется почти без теплообмена — адиабатически — и остывает. Пар, который в нём есть, на какой-то высоте становится насыщенным и конденсируется в капельки. Главная идея: эта высота определяется только температурой и влажностью воздуха у земли, а они в округе одинаковы, — поэтому у всех облаков дно на одной высоте и плоское. Класс задачи — насыщенный пар: «до какого момента пар ненасыщен» и проверка, когда он станет насыщенным.

Обозначения. h — высота; T — температура поднимающейся порции воздуха; p — давление атмосферы; $p_{\text{п}}$ — парциальное давление пара в порции; $p_{\text{н}}(T)$ — давление насыщенного пара; $T_{\text{р}}$ — точка росы (температура, при которой $p_{\text{н}}(T_{\text{р}}) = p_{\text{п}}$); c_p — удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении (≈ 1000 Дж/(кг·К)); H — высота нижней границы облаков.

1. Почему воздух поднимается. Воздух почти прозрачен для солнечного света и нагревается не сам, а от земли. Нагретый у земли воздух при том же давлении имеет меньшую плотность ($\rho = p\mu/(RT)$), сила Архимеда больше силы тяжести, и он всплывает отдельными «пузырями» — термиками.

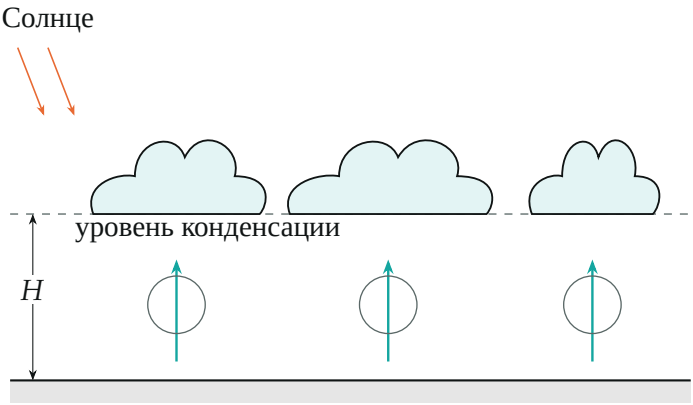


Схема: термики поднимаются от нагретой земли; на высоте H пар в них становится насыщенным, и у всех облаков дно на этом уровне. Выше — клубы, растущие вверх.

2. Поднимающийся воздух остывает. Давление атмосферы с высотой падает: на подъёме dh оно уменьшается на $dp = -\rho g\,dh$. Пузырь велик, теплопроводность воздуха мала, поэтому теплом с окружением за время подъёма он почти не обменивается — процесс адиабатический. Запишем первый закон термодинамики для порции массы 1 кг: $0 = c_V\,dT + p\,dV$. Из уравнения состояния $p\,dV = \frac{R}{\mu}dT - V\,dp$, поэтому

$$\left(c_V + \frac{R}{\mu}\right)dT = V\,dp \quad\Rightarrow\quad c_p\,dT = \frac{dp}{\rho} = -g\,dh,$$

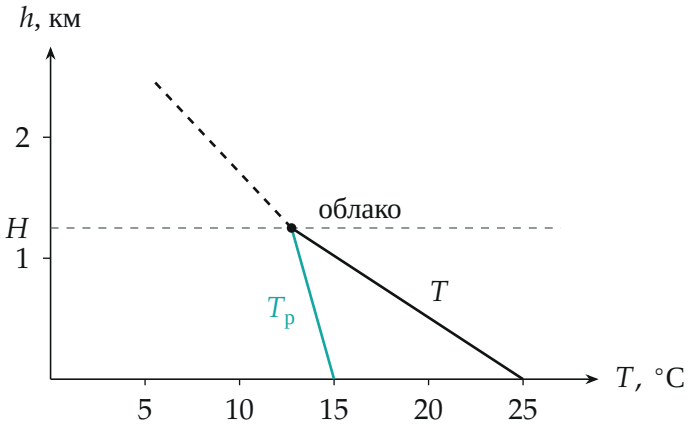
$$\frac{dT}{dh} = -\frac{g}{c_p} \approx -\frac{9{,}8}{1000}\ \text{К/м} \approx -10\ \text{К на километр.}$$

Знак минус: поднимаясь, воздух остывает, примерно на градус каждые 100 м.

3. Когда пар становится насыщенным. Доля пара в порции при подъёме не меняется, поэтому его парциальное давление $p_{\text{п}}$ падает вместе с давлением атмосферы, но медленно — примерно на 12 % на километр. А давление насыщенного пара $p_{\text{н}}(T)$ при остывании падает быстро (примерно на 6 % на градус, то есть на 60 % на километр). Значит, точка росы $T_{\text{р}}$ порции понижается лишь на $\approx 1{,}8$ К/км, а сама температура — на ≈ 10 К/км. Разность $T - T_{\text{р}}$ сокращается на ≈ 8 К на каждый километр, и на высоте

$$H \approx \frac{T_0 - T_{\text{р}0}}{8\ \text{К/км}} \approx 125\ \text{м} \cdot (T_0 - T_{\text{р}0})/1\ \text{К}$$

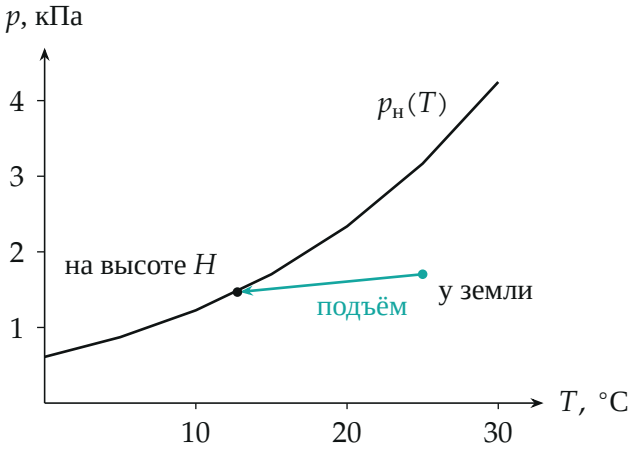
пар становится насыщенным и начинает конденсироваться. Например, при $T_0 = 25\,^\circ\text{C}$ у земли и точке росы $T_{\text{р}0} = 15\,^\circ\text{C}$ получаем $H \approx 1{,}25$ км.



Температура T поднимающегося воздуха (около 10 К/км) и его точка росы T_p (около 1,8 К/км) при $T_0 = 25\,^\circ C$, $T_{p0} = 15\,^\circ C$; линии посчитаны. Они сходятся на высоте $H \approx 1{,}25$ км — дно облака. Выше воздух остывает медленнее (пунктир): греет теплота конденсации.

4. Почему дно плоское и общее. Высота H зависит только от T_0 и $T_{\text{р}0}$ у земли. Над ровной местностью они почти одинаковы, поэтому все термики достигают насыщения на одной высоте: ниже H пар ненасыщен и капель нет, воздух прозрачен; выше — туман из капелек. Граница между ними — горизонтальная плоскость, и у всех облаков дно на ней. В

другой день (другие температура и влажность) дно окажется на другой высоте: в сухой жаркий день — выше, во влажный — ниже.



Тот же процесс на графике давления насыщенного пара. Состояние пара в порции (бирюзовая стрелка) при подъёме почти горизонтально сдвигается влево: температура падает на 12 K, давление пара — лишь на 14 %*; на высоте H стрелка упирается в кривую $p_н(T)$ — пар насыщен.*

5. Почему верх клубится. При конденсации выделяется удельная теплота парообразования. Она подогревает воздух внутри облака, и выше уровня H он остывает медленнее (около 5–6 К/км вместо 10), оставаясь теплее окружающего воздуха. Поэтому внутри облака продолжаются неровные восходящие потоки разной силы; они выносят капли на разную высоту, и верх облака получается «клубами», как поднимающиеся пузыри. Здесь, в отличие от дна, никакой общей границы нет: высота вершины зависит от силы конкретного потока.

Обратите внимание. Охлаждение поднимающегося воздуха — не потому, что «наверху холодно» (воздух не успевает обменяться теплом с окружением), а из-за адиабатического расширения: газ совершает работу за счёт своей внутренней энергии.

Проверка. Размерность: g/c_p — $\dfrac{\text{м/с}^2}{\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}} = \text{К/м}$. Оценка с наблюдениями: дно летних кучевых облаков обычно на высоте 1–2 км, что

при разности температуры и точки росы у земли 8–15 K и даёт формула пункта 3. Предел: при влажности 100 % у земли ($T_0 = T_{p0}$) получаем $H = 0$ — туман у самой земли, как и бывает.

Ответ. Нагретый от земли воздух всплывает (закон Архимеда) и, поднимаясь, адиабатически расширяется и остывает примерно на 10 K на километр. На высоте H, которая определяется только температурой и влажностью у земли (около 125 м на каждый градус разности температуры и точки росы), пар становится насыщенным и конденсируется, поэтому дно всех облаков плоское и на одной высоте. Выше теплота конденсации поддерживает неравномерные восходящие потоки, и верх облаков «клубится».