

Научная статья

УДК 534.25:551.515.3

DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-71-80

Об акустической природе «грозового носа», воронок «supercell» и торнадо

Валерий Иванович Пинаков

Конструкторско-технологический филиал
Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия
vip@sibexplo.com

Аннотация

В реальной атмосфере, на средних широтах, рассматривается процесс формирования кучево-дождевого облака *Cb calvus*. Его развитие от исходной стадии жизненного цикла до «зрелости» происходит благодаря формированию в тропосфере в окрестности уровня минимума температуры, близкого к 2 км, волновода «надземный акустический канал», являющегося аналогом «подводного звукового канала», соответствующего в океане уровню минимума скорости звука. Тропосферный «канал», связанный с зоной инверсии температуры, практически не ограничен по горизонтали. Восхождением купола *Cb calvus* в тропосфере обусловлено синхронное генерирование его точками пары волн сжатия: восходящей (над облаком) и нисходящей (в облаке). Первая может вызывать необъясненные «аэродинамические подхваты» самолетов; вторая формирует «грозовой нос» и опускания в облаке – приосевое и периферийное. Проникание облака в стратосферу приводит к нарушению динамического баланса в окрестности вершины облака и приводит к его разгрузке в нисходящей волне разрежения. Воздух в ней охлаждается до «точки росы» в месте примыкания к основанию материнского облака, что, в соответствии с законом Снеллиуса, приводит к формированию фронта конденсации в виде аэрозольной «воронки», с близкой к расчетной величине угла образующих к вертикали. В рамках оценки Д. Сноу из нее формируются либо воронка «supercell», либо воронка торнадо.

Ключевые слова

фронт конденсации, закон Снеллиуса, мезоциклон, докритические углы скольжения, волновое давление, фазовая и массовая скорости

Для цитирования

Пинаков В. И. Об акустической природе «грозового носа», воронок «supercell» и торнадо // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 2. С. 71–80. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-71-80

© Пинаков В. И., 2021

The Acoustic Nature of “Storm Nose”, “Supercell” Vortices and Tornadoes

Valeriy I. Pinakov

Design and Technology Division
of Lavrentiev Institute of Hydrodynamics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation
vip@sibexplo.com

Abstract

The process of cumulonimbus cloud Cb calvus formation in the middle latitudes of real atmosphere is analyzed in this work. Its transformation from initial lifecycle stage to “maturity” undergoes due to the formation of the waveguide called “aerial acoustic channel” in the troposphere near the level of temperature minimum that is close to 2 km altitude. This “aerial acoustic channel” can be considered as analog of “deep sound channel” that corresponds to the minimal sound speed level. Tropospheric “channel” related to the thermal inversion zone is almost unlimited horizontally. Synchronous generation of two compression waves (ascending one above Cb and descending one inside Cb) is caused by Cb calvus dome ascension. The first one can provoke the aerodynamic draft previously unexplained. The second one results in the growth of its “storm nose” and in the axial and peripheral descending mechanisms in Cb. The penetration of Cb into stratosphere results in the destruction of dynamic balance around Cb top and hence in its unloading in the descending decompression wave. Here the air cools down to the “dew point” in the place of conjugation with parental cloud – due to Snellius law it results in the formation of aerosol “vortex” as condensation front; this “vortex” has calculated value of its generatrix against vertical. Due to D. Snow’s criterion, this vortex forms either “supercell” vortex or tornado vortex.

Keywords

condensation front, Snellius law, mesocyclone, subcritical slip angle, wave pressure, phase velocity

For citation

Pinakov V. I. The Acoustic Nature of “Storm Nose”, “Supercell” Vortices and Tornadoes. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 71–80. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-71-80

Введение

Кучево-дождевое облако Cb calvus (лысое) всплывает в тропосфере, как «теплый пузырь», только в зоне свободной конвекции, находящейся, ориентировочно, выше уровня 5 км, над которым тепловой эффект конденсации обеспечивает действие архимедовых подъемных сил. На меньших высотах подъему воздуха препятствует его утяжеление вследствие действия сухоадиабатического градиента в зоне инверсии температуры на уровне, близком к 2 км. Пространство между этими уровнями в [1] квалифицируется как «область высокой устойчивости», в которой всплытие «пузырей» исключено. Тем не менее, через время порядка 10^4 с это препятствие перестает «работать», и процесс его устранения Д. Сноу сравнивает даже с «благоприятным взрывом», оказывающим помощь «пузырю». Взрыв здесь, очевидно, отсутствует, но этот позитивный процесс можно идентифицировать как «волновой эффект». Удивительно, но при восхождении Cb calvus визуально наблюдается активное развитие нисходящих процессов. На барограмме регистрируется «прибавка» к действующему аэростатическому давлению, для которой введен термин «грозовой нос». В восходящих облаках реализуется интенсивное приосевое опускание капельно-воздушной смеси под основание облака, доходящее до земной поверхности. Кроме того, имеет место периферийное опускание, наблюдаемое как опускание аэрозоля боковой поверхности облака [2; 3]. Необходимо отметить позитивную роль актуальной монографии [4], в которой дан обзор и анализ всех направлений и работ, связанных с объяснением механизмов формирования тропических циклонов и торнадо. Охвачено по меньшей мере полторы сотни лет до ее появления в 2013 г. Примечательно, что в ней хронологически первой является публикация знаменитого философа Фрэнсиса Бэкона в 1622 г., т. е. за одиннадцать лет до суда папской инквизиции над Га-

лилео Галилеем! В монографии поставлен вопрос об отсутствии реальных соображений, связанных с формированием на основании материнского облака аэрозольной «воронки», являющейся предвестником возможного урагана торнадо.

Вероятный механизм формирования Сб

По-видимому, с упомянутым выше «волновым эффектом» имели дело авторы деления жизненного цикла Сб на три стадии (кучевого облака Сс, зрелости, диссипации) Х. Байерс (H. Byers) и Р. Брейам (R. Braham) (США). В 1948 г., при исследовании Сс, первой стадии «жизни» Сб, они выяснили, что в таком облаке «конвергенция скорости ветра» много больше, чем дивергенция. Иначе говоря, это не обычное кучевое облако; его можно идентифицировать, например, как «Сс conv.». Оно формируется течением, в котором в интервале значений z примерно от 1 до 7 км при горизонтальных габаритах около 10 км реализуется горизонтальный приток воздуха в приосевое пространство, много больший, чем отток из него [2]. В результате Сс conv. как бы вовлекается в стадию зрелости и преобразуется в Сб calvus.

Этот же «научный тандем» после определения конфигураций 250-ти Сб calvus, высоты которых составляли $h_1 = 7,5$, $h_2 = 9$, $h_3 = 11$ и $h_4 = 12,5$ км, провел осреднение их реальных размеров, что привело к практически симметричным осевым сечениям Ω_i ($i = 1,..4$). Уместно предположить, что мы рассматриваем поверхность одного развивающегося кучево-дождевого облака, сечения Ω_i которого являются сечениями изохрон растущего в стадии зрелости купола Ω Сб calvus. Они соответствуют моментам времени $t_i = t(h_i)$ и даны на рис. 1 слева от оси z в цилиндрических координатах $Z(r, z)$, где $r \geq 0$.

Исходя из значений параметров тропосферы, соответствующих «средним широтам» [5], полагаем уровень тропопаузы $H \approx h_4$. Кривые безразмерных распределений даны справа от оси z над единичным отрезком (см. рис. 1). Изменение температуры линейно, $\alpha(z) = T/T_0 \approx 1 - \theta z/T_0$, здесь $\theta \approx 6,6$ К/км и $T_0 \approx 300$ К – температура приземного слоя.

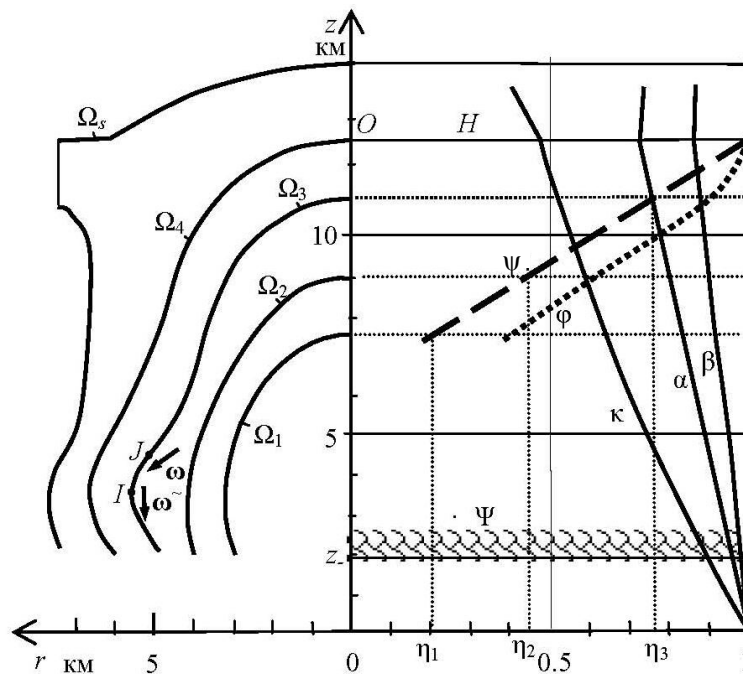


Рис. 1. Ω_i – фазы роста купола Сб calvus; зависимости параметров воздуха от z
 Fig. 1. Ω_i – growth phases for Cb calvus dome; dimensionless dependencies of air parameters upon z

Здесь, и далее подчеркнуты параметры воздуха. Скорость звука и плотность воздуха соответствуют кривым $\beta(z) = \underline{c}/\underline{c}_0 \approx \alpha^{0.5}$ и $\kappa(z) = \underline{\rho}/\underline{\rho}_0 \approx \alpha^{2.5}$, где $\underline{c}_0 \approx 344$ м/с, $\underline{\rho}_0 \approx 1,18$ кг/м³ при атмосферном давлении 1 000 гПа.

В середине прошлого века в США и в СССР было открыто природное явление «подводный звуковой канал» (ПЗК). Это неограниченный по горизонтали волновод, который реализуется в океане, в окрестности уровня минимума скорости звука. В реальности ее уменьшение составляет $\varepsilon = 0,5$ %. В соответствии с «лучевой трактовкой», разработанной Л. М. Бреховских [6], некоторые лучи точечного источника гармонических волн длиной $\lambda \rightarrow 0$ захватывается волноводом. Реализуются углы скольжения χ (дополнительные к углам падения) лучей по отношению к горизонтали. Они удовлетворяют неравенству $|\chi| \leq \chi_c \approx \approx \text{Arccos}(1 - \varepsilon) \approx 6^\circ$, и значения χ соответствуют интервалу от -6° до $+6^\circ$. Согласно теории, вертикальный габарит пучка захваченных лучей близок к 120 м. В окрестности подводного точечного источника амплитуда гармонической волны падает как $1/L$, в то же время при распространении в ПЗК она меняется как $1/L^{1/2}$ (L – расстояние от источника) [7]. К сожалению, использование термина «лучи» корректно только при рассмотрении гармонических волновых полей. Тем не менее, взрывной опыт в ПЗК показал, что сигнал от взрыва 2,7 кг тротила с растянутым на 90 км фронтом был зафиксирован гидрофонами через 1 час 15 мин. на расстоянии 5 750 км [7]. Таким образом, можно сделать вывод, что в ПЗК закон Снеллиуса в основном «работает» и в случае аперидических волн. Появляется смысл введения термина «квазилучи» для линий, нормальных к фронтам негармонических волн.

В отличие от океанского минимума, в атмосфере ε константой не является, тем не менее, реализуются волноводы с различными минимумами скорости звука \underline{c} . В тропосфере они наблюдаются в окрестности уровня $\underline{z} \approx 2$ км, близкого к основанию зоны термической инверсии Ψ , показанной на рис. 1 узорной штриховкой, в связи с наличием в ней облаков Cu hum . (хорошей погоды). Эффекты, порождаемые волноводом, можно рассматривать как возмущения в тропосфере, параметры которой заданы кривыми α , β и κ (см. рис. 1). В окрестности Ψ формируется волновод «надземный акустический канал» (НАК). Например, на диаграмме Д. Сноу уменьшение $\varepsilon = 0,5$ %, при понижении температуры на $2\varepsilon = 1$ % (на 3 К), здесь $\chi_c \approx 6^\circ$. В то же время возможны понижения до 15 К [5], при которых $\varepsilon = 2,5$ %, и углы захвата $|\chi| \leq \chi_c \approx \text{Arccos}0,975 \approx 12^\circ$.

По-видимому, в НАК реализуется процесс формирования Cu con v. , в котором горизонтальное разбегание волны (от взрыва в ПЗК) выглядит как «обращенное вспясть». Естественно полагать, что такой процесс запускается предгрозовым падением давления на величину порядка 1 гПа на территории с габаритами в тысячи километров. Оно должно приводить к генерированию в НАК сходящихся волн сжатия, что, в соответствии с принципом Ле Шателье, можно считать реакцией на внешнее воздействие находящейся в равновесии атмосферы. На барограмме с «грозовым носом» время между началом снижения давления и грозой – порядка 10^4 с [3]. Процесс формирования в НАК пологих фронтов волнового сжатия чрезвычайно сложен, тем не менее, им свойственно самовыравнивание вследствие отклонения квазилучей в сторону меньших значений \underline{c} . Их проекции на грунт должны пересекаться в зоне будущего Сб, где реализуется и адиабатический, и диссипативный нагрев, который обусловлен столкновением разнонаправленных масс воздуха с множеством хаотически ориентированных завихрений. Такое повышение T в зоне габаритом порядка 10 км может приводить к локальному «отпусканию» волноводом НАК захваченных квазилучей, с реализацией конвергенции, которая обеспечивает формирование восходящего Cu con v. Обычно перед грозой послеполуденная жара сменяется «предгрозовой духотой», обусловленной, по-видимому, высоким уровнем конвергенции скорости ветра, перемещающего воздух с частицами пыли с периферии в эпицентр родившегося кучево-дождевого облака. Мощные, значительные по площади поперечного сечения восходящие токи воздуха формируются над эпицентром [5]. Выявление «надземного акустического канала» позволяет объяснить процессы, связанные с развитием Сб.

Генерирование волн куполом Ω

Известно, что в зоне свободной конвекции реализуется нарастание архимедовой подъемной силы, обусловленной тепловым эффектом конденсации пара в Сб [1; 2]. При симметричной конфигурации имеет место и симметричное распределений скоростей: v (восхождения в Сб, конвекции) и w (роста Ω по нормалям). Совпадающие с осью z векторы можно обозначать как скаляры v и $w = dh/dt$ (их направление определяют знаки). Скорость восхождения O (роста Сб) $w = \max|w|$. Точки купола Ω генерируют по внешним нормалям Сб-волну сжатия в воздухе атмосферы, покоящемся на большом удалении по оси z . Она соответствует исходной эпюре скоростей $\underline{w} = \underline{w}$ и распределению волнового давления $\underline{\sigma}_\Omega \approx \rho \cdot \underline{c} \cdot \underline{w} / w = \rho \cdot \underline{c} \cdot \underline{w} / w$; на вершине $\underline{\sigma}_O = \underline{\sigma}(h) \approx \rho \cdot \underline{c} \cdot w$. Высота нарастает от $h_1 = 7,5$ км до тропопаузы $H = 12,5$ км. При этом давление $\varphi \approx \underline{\sigma} / \underline{\sigma}_H$ (см. рис. 1) изменяется по пунктирной кривой от 0,33 до 1 (от 12 до 38 гПа), если скорость $\psi = w/w_H$ соответствует прерывистой прямой от $\psi_1 = 0,2$ до $\psi_H = 1$ (от 5 до 25 м/с).

При росте Сб геометрия его «абсолютно мягкой» контактной поверхности Ω изменяется достаточно слабо, поскольку в точках купола, в соответствии с третьим законом Ньютона, облаку противодействует тропосфера и реализуется динамический баланс. В связи с этим точки купола синхронно с Сб-волной генерируют Сб-антиволну сжатия, которая распространяется в аэрозоле облака со скоростью звука c . Ее исходная массовая скорость $\underline{w} \approx -\underline{w}$ направлена по внутренним нормалям Ω .

В реальности существования Сб-антиволны убеждает переход в систему отсчета Z' с началом в вершине O . В ней происходит столкновение восходящего со скоростью $v' = v - w$ Сб calvus и воздуха тропосферы, нисходящего со скоростью $(-w)$. Неинерциальность системы координат Z' несколько возрастает, от $|g| = 9,8 \text{ м/с}^2$ до $|g| + |a|$, где $|a| \leq 1,2 \text{ м/с}^2$. Это изменение существенно не влияет на ход рассматриваемого процесса. Выявляется акустический механизм реализации нисходящей активности в восходящем Сб.

Атмосфера состоит в основном из смеси двухатомных газов – воздуха, который подчиняется уравнению Клайперона $p = \rho RT$ (газовая постоянная $R = 287 \text{ Дж/(кгК)}$) и соответствует значению показателя адиабаты $\gamma = c_p/c_v = 1,4$, где c_p и c_v – удельные теплоемкости. Согласно монографии Л. В. Овсянникова [8], законы динамики *совершенного* газа выражаются системой из пяти квазилинейных дифференциальных уравнений первого порядка, для пяти искомым функций, с четырьмя независимыми переменными. Здесь доказываем, что решениям гиперболической системы не свойственны разрывы первого рода (скачки), в то же время такие разрывы могут иметь первые производные решений. Такие же уравнения соответствуют и динамике «калорически совершенного» [9] (*идеального политропного*) газа, являющегося моделью аэрозоля облака, в котором $R < \underline{R}$ и показатель $\gamma < \underline{\gamma}$.

Фундаментальным свойством системы является ее гиперболичность, описываемая с помощью «характеристик»: контактной – C_0 , и пары звуковых – C_+ и C_- . Конвективное восхождение воздуха в атмосфере представляет собой сложнейшую «иерархию» растущих и взаимодействующих характеристик C_0 , габариты которых пропорциональны их высотам. По-видимому, наибольшая из контактных характеристик соответствует поверхности Ω_4 . Важно, что C_0 «не только отделяет одни частицы от других, но и является геометрическим местом их траекторий». В то же время «характеристики» C_+ и C_- должны соответствовать Сб-волнам и Сб-антиволнам сжатия ($\underline{\sigma}(\underline{w})$ и $\sigma(\underline{w})$).

Приосевые опускания и «грозовой нос»; периферийные опускания

Поскольку грозовое облако посылает в направлении земной поверхности только Сб-антиволну, являющуюся волной сжатия, следует ожидать, что «грозовой нос» представляет собой некоторое неотрицательное «приращение» к уровню реализующегося аэростатического давления. Согласно наблюдениям, из основания облака исходит приосевой воздушно-капельный

поток с габаритным размером $d \approx 1$ км. Такая картина «приосевого опускания» в облаке визуально наблюдается и в сотнях метров от его основания [2]. Частицы потока достигают земной поверхности и движутся по ней слоем, растекаясь от эпицентра. «Грозovým носом» называют результат регистрации на ленте барографа изменений динамического напора потока воздушно-капельной смеси, который генерируется Сб-антиволной. Применение доплеровских радаров позволило специалистам США вести измерения нисходящих массовых скоростей q «на живых облаках» в метеоусловиях южных штатов [2]. Из 116-ти измерений, полученных на уровнях $z < 5$ км, в 14-ти случаях реализовались q от нуля до 3 м/с, в 59-ти случаях – от 3 до 6 м/с, в 27-ми – от 6 до 9 м/с, в 12-ти – от 9 до 12 м/с, в 2-х – от 12 до 15 м/с; большие скорости 21 и 24 м/с реализовались по разу. Более высокие значения q не наблюдались, и в литературе фигурирует максимальная скорость приосевого опускания $q_m = 24$ м/с. Сб-антиволна распространяется вниз в восходящем конвективном потоке, скорость которого в точках оси z может достигать значений $v_- \approx 40$ м/с [2]. Наличие разности скоростей $v_- - w \approx 15$ м/с приводит к понижению приосевой скорости распространения возмущения до некоторого значения c_- . В соответствии с соотношением Р. Эмдена [10] $c_- \approx c - v_-$, т. е. в точках оси имеет место «волноводный эффект», понижающий скорость звука на $\varepsilon \approx 5\%$; его действие неминуемо отразилось на результатах описанных выше измерений q .

Для выявления механизма периферийного опускания в Сб следует учитывать, что при приземной влажности воздуха $f_0 = 0,6$ и $T_0 = 300$ К точка росы соответствует $T^* = 291$ К, и конденсация достигается на уровне 1,3÷1,4 км. Под куполом Ω_4 температура составляет -50 °С. Массовая доля конденсата в облачном аэрозоле этого облака составляет $k_4 = 1,4\%$, в менее высоких облаках она может быть только ниже. Соотношения [9] приводят к граничным минимальным значениям: $R = 283$ Дж/(кгК) и $\gamma = 1,37$. Значения фазовой скорости c в аэрозоле Сб соответствуют неравенству: $1 > c/c_- \geq ((1 - k_4)\gamma/\gamma)^{1/2} = 0,982$. При распространении из облака может реализоваться полное внутреннее отражение, если углы скольжения удовлетворяют неравенству $|\chi| \leq \chi_c$, где $\chi_c \leq \text{Arccos}0,982 \approx 10^\circ$. Нетрудно увидеть (см. рис. 1), что нормальные к поверхностям Ω_1 и Ω_2 квазилучи Сб-антиволны не пересекаются с «собственными» поверхностями под малыми углами скольжения. В то же время это не свойственно изохроне Ω_3 , в нижней части которой антиволна испытывает полное внутреннее отражение на «отражающей поверхности» Ω_3^{\sim} , соответствующей участку IJ контура Ω_3 . Квазилучи сжатия ω Сб-антиволны после отражения превращаются в квазилучи, которые соответствуют массовой скорости ω^{\sim} , вызывающей перемещение облачного аэрозоля, воспринимаемое наблюдателями, как опускание «с боков облака» [2]. Оно существенно изменяет геометрию купола, на сечении Ω_3 появляются перегибы, не характерные для Ω_1 и Ω_2 .

Волна разрежения, формирование «воронки»

При проникании восходящего купола Ω в стратосферу возможно кардинальное изменение ситуации. В стратосфере при $h \geq H$ тропосферное противодействие восхождению Сб *calvus* падает, устойчивость купола в проникшей в стратосферу зоне теряется; она начинает перемещение вверх (в том числе и за счет накопленной упругой энергии воздуха, максимальной при $\sigma \approx 38$ гПа). Такие события регулярно наблюдаются с искусственных спутников, когда над уровнем тропопаузы образуется купол из воздуха и ледяных частиц высотой около 2 км [1], который внешне сходен с изохроной Ω_s (см. рис. 1). Важно, что сверху идет разгрузка облака, распространяющаяся в виде волны разрежения, в которой Сб-антиволна прекращает существование, как и Сб-волна. При этом «грозовой нос» может стать отрицательной величиной, что фиксируется в [11] сотрудниками ИФА им. А. М. Обухова РАН как «скачок разрежения», что некорректно, так как при распространении волны разрежения реализуется изоэнтропическое адиабатическое течение с постепенным понижением параметров. По-видимому, под «скачком» подразумевается снижение давления за время порядка одной секунды.

Нисходящая волна с нарастанием разрежения до μ по вертикали дается соотношением $\mu = -rc\delta$. В ней массовая скорость $\delta > 0$ направлена вверх. Сигнал о начале спада «грозового носа» бежит от стратосферы до наземного барографа в волне μ примерно 40 с. Целесообразен анализ упрощенной схемы, которая показана на рис. 2, где при давлении p из тумана в воздух, вертикально, бежит плоская волна μ , в которой скорость δ нарастает достаточно быстро, и фазовая скорость, например, составляет $c \approx 0,982c$, поскольку не зависит от знака волны. Так как воронки нарастают на выступах оснований материнских облаков [4], полагаем, что горизонтальное плоское основание Θ снабжено аэрозольным выступом Γ в виде полушария, с привязкой локальных цилиндрических координат (ξ, ζ) . Полагаем также, что температурное поле однородно и соответствует точке росы T^* . Понятно, что прохождение μ по квазилучам g приводит к адиабатическому охлаждению воздуха с некоторым «конденсационным подогревом», который должен учитываться в выражении для охлаждения $\eta = ((\gamma - 1)/\gamma)T^*\mu/p^*$ при $\gamma < \gamma_*$ и во всех точках квазилучей g устанавливается температура $T^* - \eta$.

В то же время для квазилучей, которые достигают Γ , картина не так проста. Получается, что доминирует «критическое отражение». Квазилучи j_c достигают сферического купола Γ под углом χ_c в точке J_c , которая на полусфере соответствует окружности, показанной пунктиром. Согласно Снеллиусу, квазилучи j_c раздваиваются. Преломляясь, они становятся касательными к Γ квазилучами j_\wedge , образующими коническую поверхность Λ с половинным углом при вершине $\chi_c \leq 10^\circ$ (учитываем $k < k_d$). При этом Λ является «отражающей» поверхностью для всех лучей, нисходящих в круге радиусом $0J_c$. Имеет место их полное внутреннее отражение; отраженные квазилучи j_* показаны на рис. 2. Так как $|\delta^*| = |\delta|$, суперпозиция этих волн в точках внутренней приповерхностной зоны Λ приводит практически к удвоению массовой скорости ($|\delta + \delta^*| = 1,96 \cdot |\delta|$). В результате охлаждение Λ $\hat{\eta} \approx 2\eta$, и в воздухе выявляется аэрозольный объект с геометрией, близкой к Λ , за которым закрепился термин «воронка». Относительно Θ она переохлаждена на $\hat{\eta} - \eta = \eta$, вращение не является ее атрибутом. Воронкам посвящено множество фото- и видеоматериалов информационных систем «Яндекс» и «Google».

Воронки в условиях градиента температуры

Рассмотренную схему следует согласовать с реальными условиями, когда к распределениям параметров α , β и κ добавляется приземная влажность, например, $f_0 \approx 0,7$, с точкой росы $T^* = 294$ К. На рис. 3 в координатах (ξ, ζ) имеет место выступ Γ^* на исходном основании материнского облака (ОМО) Θ^* , уровень которого дается равенством $\zeta^* = (T_0 - T^*)/\theta \approx 0,9$ км.

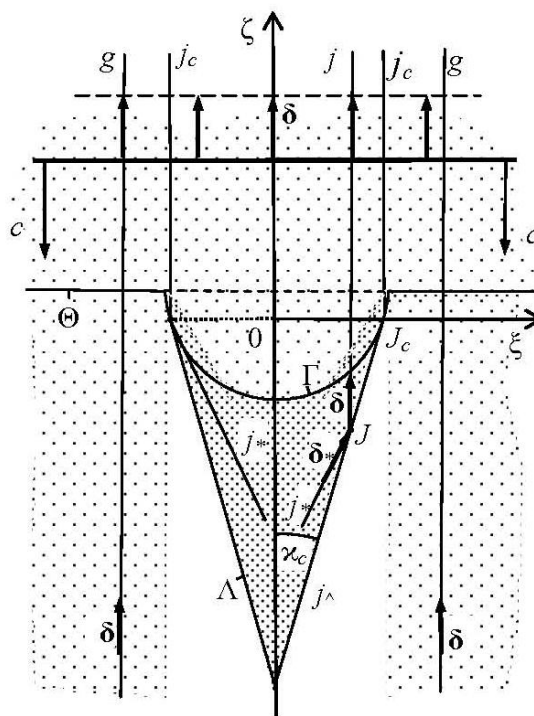


Рис. 2. Фронт конденсации в плоской волне разрежения, распространяющейся из выступа на основании материнского облака

Fig. 2. The condensation front in the flat depression wave spreading from protuberance on the parental cloud base

Здесь $c' = 340$ м/с; $\rho' = 1,12$ кг/м³; $p' = 932$ гПа; и $\gamma = 1,37$. При скорости $\delta_1 = 2$ м/с волновое разрежение $\mu_1 = -7,6$ гПа вызывает охлаждение аэрозоля на $\eta_1 = ((\gamma - 1)/\gamma)T\mu_1/p' = 0,66$ К, что

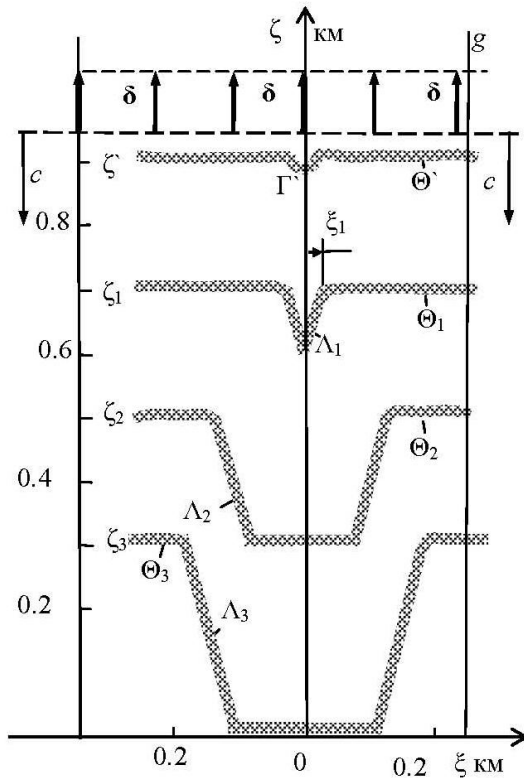


Рис. 3. Коническая аэрозольная воронка с вершиной на уровне $\zeta_1' \approx 0,6$ км; воронки «supercell», которые «усечены» при $\zeta_2' \approx 0,3$ км и при $\zeta_3' \approx 0$

Fig. 3. Conical aerosol vortex with the top at $\zeta_1' \approx 0,6$ km; “truncated” supercell vortices at $\zeta_2' \approx 0,3$ km and at $\zeta_3' \approx 0$

Приращение $9\eta_1 \approx -6$ К соответствует разрежению $\mu_3 \approx -24$ гПа в окрестности оси ζ , которая может совпадать с осью z , реализуется радиальный приток в поверхность Λ_3 окружающего воздуха, обладающего моментом импульса N_ζ , величина которого определяет «характер» процесса дальнейшего развития кучево-дождевого облака.

«Supercell», торнадо, пылевой вихрь

В [1] описан метод оценки параметра N_ζ в будущем Сб, вырастающем из «мезоциклона» диаметром около 10 км, с применением доплеровского радара. Прогноз оказался достоверным. По-видимому, при $N_\zeta \approx 0$ формируются внешне зловещие, но, в сущности, безопасные воронки облаков «supercell», их фото- и видеоизображения в системах «Яндекс» и «Google» обычно отнесены к разделу «торнадо». Они сходны с воронками Λ_2 и Λ_3 , которые формируются при массовых скоростях $\delta_2 = 4$ м/с и $\delta_3 = 6$ м/с. Внутренние отражения волн разрежения от образующих должны «стягивать» воронки по горизонтали со скоростями $\Delta\delta \approx -2\sin\chi_c \cdot \cos\chi_c \cdot \delta$, т. е. $\Delta\delta_2 \approx -1,2$ м/с и $\Delta\delta_3 \approx -1,8$ м/с. Воронки стабилизируются циклострофическим балансом, при котором разрежение $\Delta\mu$ компенсируется центробежным разрежением Δp воздуха на поверхности воронки. Течение на высотах более 100 м близко к вращению воздуха около ζ , и можно приближенно исходить из уравнения Бернулли. Отсюда

приводит к понижению фронта конденсации на $\eta_1/\theta \approx 100$ м (и слой такой толщины нарастает на Θ'). Так как охлаждение воронки Λ_1 соответствует $\eta^{\wedge} = 2\eta_1$, она переохлаждена по сравнению с понизившемся на 100 м фронтом конденсации Θ' . Этим обусловлено ее выступание на $\eta_1/\theta = 100$ м из Θ' . Далее происходит «событие», при котором в течение 10 с после исходного генерирования μ_1 (из Θ') волна разрежения отражается от грунта и распространяется вверх со скоростью c' в виде волны $(-\mu_1)$. Это приводит к дополнительному охлаждению во всех токах системы на η_1 . Процесс генерирования волны разрежения с массовой скоростью $-\delta_1 = -2$ м/с приводит к выявлению стационарного фронта конденсации ОМО Θ_1 на высоте $\zeta_1 \approx 0,7$ км с уровнем охлаждения $2\eta_1$. При этом охлаждение воронки Λ_1 $\eta^{\wedge}_1 = 3\eta_1$. Она имеет конфигурацию перевернутого конуса радиусом $\xi_1 \approx 20$ м с координатой вершины $\zeta^{\wedge}_1 = 0,6$ км.

В аналогичном процессе при вдвое большей скорости $\delta_2 \approx 4$ м/с снижение температуры ОМО Θ_2 на $4\eta_1$ приводит его на уровень $\zeta_2 \approx 0,5$ км; при этом уровень «усечения» воронки Λ_2 , охлажденной на $6\eta_1$, имеет значение $\zeta_2^{\wedge} \approx 0,3$ км. При $\delta_3 \approx 6$ м/с температура ОМО Θ_3 понижается на $6\eta_1$, и его уровень $\zeta_3 \approx 0,3$ км; при этом «усечение» воронки Λ_3 , охлажденной на $9\eta_1$, реализуется на уровне $\zeta_3^{\wedge} \approx 0$, она примыкает к грунту.

азимутальная скорость аэрозоля воронки $u \approx (2c \cdot \Delta\delta)^{1/2}$. И Λ_2 , и Λ_3 сохраняют форму, если они вращаются с линейными скоростями $u_2 \approx 28$ м/с и $u_3 \approx 35$ м/с.

При больших значениях N_c , выявляющихся в процессе «приземления» поверхности циклострофического баланса Σ (являвшейся в исходном состоянии «воронкой»), ее приближение к грунту приводит к нарушению баланса с «разрушением» Σ в приземной зоне (вследствие вязкого торможения воздуха). Над этой зоной поверхность Σ «исполняет роль всасывающего рукава пылесоса» [1]. Радиально стекающийся с циклонической завихренностью воздух в приземной зоне формирует азимутальное течение с большой скоростью u^* , показывающей «свирепый характер урагана торнадо». Он захватывает и тащит песок, пыль, листья, мусор и различные обломки, частично втягиваемые в хобот Σ . Согласно Д. Сноу, $\mu^* \approx -100$ гПа, но здесь следует ожидать, что $c^* \approx 300$ м/с и $\rho^* \approx 1,3$ кг/м³, поэтому массовая скорость подъема $\delta^* \approx -\mu^*/(\rho^* c^*) \approx 25$ м/с. Применение квазистационарного приближения (упомянутого выше) позволяет получить оценку скорости азимутального вращения в торнадо $u^* \approx (2c^* \delta^*)^{1/2} \approx 120$ м/с; потери на разрушения снижают ее величину. Устойчивость ядер длиной в километры – результат отражений от Σ волн разрежения с докритическими углами скольжения квазилучей.

Пылевой вихрь формируется при восхождении больших термиков в слой инверсии Ψ с образованием кучевого «облака на вершине» [12]. Исследования процессов подъема термиком проведены в рамках несжимаемой жидкости. В упругом воздухе эффект усиливается, поскольку тыльная сторона большого термика генерирует волну разрежения, квазилучи которой захватываются и фокусируются в двухфазном вихре с частицами сыпучего грунта. Структура вихря сложнее, чем структура торнадо. По-видимому, здесь значения исходного момента импульса достаточно высоки, и процесс поддерживается благодаря фокусировке волны разрежения на разрушаемом сыпучем грунте. Процесс прекращается при перемещении фокуса волны, например, на травянистый участок. Всем знакомые, вызывающие удивление приземные вихри в солнечную погоду – результат действия флуктуаций разрежения в надземном воздухе.

Выводы

Основным результатом настоящей работы является объяснение механизма формирования, в соответствии с законом Снеллиуса, симметричной аэрозольной «воронки» с оценочным значением угла образующих к ее оси. Вращение не является неотъемлемым признаком воронки. Она представляет собой фронт конденсации в волне разрежения, которая генерируется при вхождении вершины Cb calvus в стратосферу.

Впервые указывается, что в растущих Cb calvus купол Ω синхронно генерирует в тропосфере пару волн сжатия: Cb-волну и Cb-антиволну. Их выявление с анализом процессов и оценкой физических параметров позволило найти ответы на важные вопросы и, в частности, объяснить механизм формирования урагана торнадо.

Оправдан качественный анализ при использовании термина «волновод» в случаях негармонических волновых полей. Обосновано выявление «надземного акустического канала» (НАК), аналогичного «подводному звуковому каналу» (ПЗК).

Объяснена природа «аэродинамического подхвата», причиной которого является полет над быстрорастущим Cb, так как восходящая «Cb-волна» нарушает режим стационарного обтекания авиалайнера, превращая его в неустановившееся, с потерей внутренней балансировки и скорости полета. Сегодня скорости роста облаков можно измерять с помощью доплеровских радаров, серийный выпуск которых в России освоен.

Список литературы

1. Сноу Д. Т. Торнадо // В мире науки. 1984. № 6. С. 44–55.
2. Боровиков А. М., Гайворонский И. И., Зак Е. Г., Костарев В. В., Мазин И. П., Минервин В. Е., Хргиан А. Х., Шметер С. М. Физика облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 459 с.
3. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 568 с.
4. Белоцерковский О. М., Андрущенко В. А., Шевелев Ю. Д. Динамика вихреобразных течений в атмосфере, обусловленных природными факторами. М.: ИЦ «Полет Джонатана», 2013. 431 с.
5. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. М.: Наука, 2006. 582 с.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1975. 343 с.
7. Исаакович М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.
8. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. М.: Наука, 1981. 368 с.
9. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред, часть 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
10. Чернов Л. А. Акустика движущейся среды // АЖ. 1958. Вып. 4. С. 300–306.
11. Калашник М. В., Куличков С. Н. О возмущениях давления, вызываемых движущимся тепловым источником фронтального типа (гидростатический режим) // ФАО. 2019. Т. 55, № 5. С. 51–61.
12. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980. 549 с.

Информация об авторе

Валерий Иванович Пинаков, кандидат технических наук

Information about the Author

Valeriy I. Pinakov, Candidate of Technical Sciences

*Статья поступила в редакцию 15.03.2021;
одобрена после рецензирования 20.04.2021; принята к публикации 11.05.2021
The article was submitted 15.03.2021;
approved after reviewing 20.04.2021; accepted for publication 11.05.2021*