



W numerze 3 *Delt*y z 1981 roku prof. Haman przedstawił mechanizm powstawania deszczu. Aby powstał deszcz, konieczne są jądra kondensacji, na których mogą się formować średniej wielkości krople chmurowe. Krople te po zamrożeniu tworzą cząstki lodu o własnościach umożliwiających powstanie wielkich kropli chmurowych. Te z kolei, wymiatając napotkane na swej drodze krople chmurowe, rosną do rozmiarów kropli deszczowych, które docierają do powierzchni Ziemi. Cały proces powstawania deszczu trwa ok. 30 minut. Spróbujmy wyjaśnić, jaki rodzaj chmur może dawać taki deszcz.

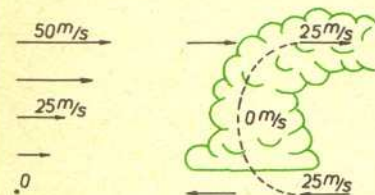
W ciepły, słoneczny dzień powietrze ogrzane w pobliżu powierzchni Ziemi zaczyna unosić się do góry, czemu towarzyszy powolne jego ochładzanie. Dzieje się tak dlatego, że w miarę wznoszenia ciśnienie otaczającego powietrza maleje i cieplejszy „bąbel” rozszerza się. Energia konieczna do tego rozszerzania może mieć swoje źródło jedynie w energii termicznej powietrza.

W konsekwencji powietrze osiąga stan nasycenia i rozpoczyna się proces kondensacji pary wodnej w krople chmurowe.

Na pierwszy rzut oka wydaje się, że w dużym cumulusie kropla przebywa wystarczająco długo, aby mogła urosnąć do rozmiarów kropli deszczowej. W rzeczywistości w zwykłych cumulusach rzadko powstaje deszcz. Jest to możliwe tylko dla chmur wyjątkowo wysokich. Chmury takie są jednak rozrywane przez wielkie różnice prędkości wiatru w dolnych i górnych warstwach atmosfery.

W niektóre dni można łatwo zaobserwować, że wiatr w pobliżu Ziemi wieje w przeciwnym kierunku niż wiatr unoszący niskie chmury, a te z kolei poruszają się w przeciwnym kierunku niż chmury wysokie. Warto też wspomnieć, że nawet szybkie samoloty często poruszają się w przeciwnym kierunku niż ten, w którym zmierzają, bo prędkość przeciwnego wiatru jest większa niż ich prędkość względem powietrza. Prędkość wiatru sięga czasami 50 m/s.

Rozważmy ten problem z punktu widzenia chmury. Zgodnie z tym, co napisał prof. Haman, musi być ona tak wysoka, by jej szczyt zawierał kryształki lodu, a podstawa sięgała prawie powierzchni Ziemi, gdzie znajduje się ogrzane Słońcem najbardziej wilgotne powietrze. Prędkość wiatru przy takiej różnicy wysokości może zmieniać się dość gwałtownie — powiedzmy o 50 m/s od podstawy do wierzchołka chmury. Załóżmy więc, że poruszamy się (tzn. chmura) z prędkością 25 m/s względem Ziemi. Powietrze u podstawy chmury będzie się wtedy poruszało w naszym kierunku z prędkością 25 m/s. Chcemy ponadto, by wznosiło się ono do górnych warstw chmury i włączało w poziomy ruch również z prędkością 25 m/s, ale w przeciwnym kierunku niż u podstawy. Powstaje wtedy przepływ przedstawiony na rys. 1. Zaczyna to przypominać *cumulonimbus*. Kropkowana linia to kontur chmury; rozpoczynający się od płaskiej podstawy, gdzie napływające od Ziemi ciepłe i wilgotne powietrze jest już wystarczająco oziębite, by stało się nasycone, a kończący rozległą warstwą wysokiej chmury lodowej po prawej stronie.



Rys. 1

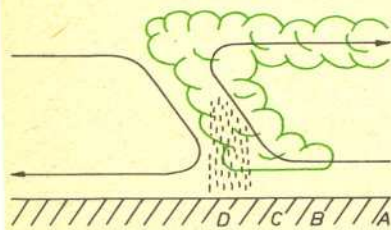
Jedną z niedoskonałości takiego modelu jest to, że wznoszące się powietrze musi odchylić górny wiatr. Inną natomiast to, że deszcz po powstaniu pada we wstępującym prądzie powietrza zmniejszając jego prędkość.

Przypuśćmy, że udoskonalimy nasz model wyginając przepływ powietrza tak, jak to pokazuje rys. 2. Krople deszczu mogą teraz wypadać z chmury poza prąd wstępujący, co dodatkowo ułatwia ruch powietrza ku górze. Ponadto spadające w chłodnym, nienasyconym powietrzu krople intensywnie parują i powietrze staje się jeszcze zimniejsze. Coraz szybsze spадanie zimnego powietrza zapobiega mieszanii się z prądem wstępującym.

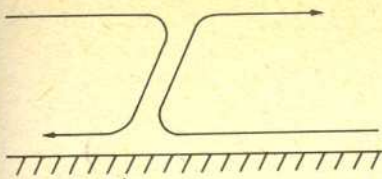
Tak wymodelowana symetryczna cyrkulacja ma jednak pewną wadę (zauważoną przez Franka Ludlama w 1960 roku) — nie może ona spełniać równań ruchu Newtona. Aby zrozumieć, dlaczego tak jest, musimy się odwołać do ważnego równania dynamiki płynów — równania Bernoulliego. Mówi ono, że energia kinetyczna cząstki płynu zmienia się na skutek działania ciśnienia lub z powodu zmiany jej energii potencjalnej tak, że

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gh = \text{const.}$$

Nie znamy ciśnienia wewnątrz naszej chmury, ale wiemy, że powietrze w prądzie wstępującym porusza się z przyspieszeniem do góry (rys. 2). Gdy dotrze ono do szczytu chmury, musi się niemal zatrzymać, gwałtownie zmienić kierunek i następnie ponownie nabrać prędkości w



Rys. 2



Rys. 3

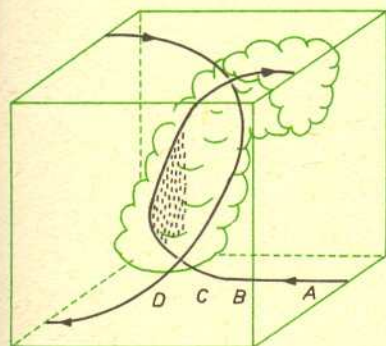
warstwie lodowej. Równanie Bernoulliego pokazuje, że byłoby to możliwe jedynie w przypadku dużego ciśnienia na szczycie chmury.

Z kolei powietrze nadchodzące z lewej strony musi zmienić swój kierunek, by włączyć się w prąd zstępujący. Nie zmienia ono przy tym wartości v^2 ani $g \cdot h$, więc nie może przejść przez obszar wysokiego ciśnienia w pobliżu wierzchołka prądu wstępującego.

Można uniknąć tej trudności i uzyskać poprawny fizycznie model, jeśli przyjmiemy, że granica między prądem wstępującym i zstępującym jest nachylona w przeciwnym kierunku — tak jak na rysunku 3. Zmniejszy się jednak wtedy efektywność naszego modelu, bo deszcz nie będzie mógł już padać w chłodnym prądzie zstępującym.

Można temu zaradzić wprowadzając do naszego modelu jeszcze jedną poprawkę. W efekcie dostaniemy jeden z najładniejszych w przyrodzie mechanizmów.

Przesuńmy w tym celu prąd zstępujący w prawo tak, aby znalazł się poniżej wstępującego. Musimy teraz wprowadzić trzeci wymiar i zdeformować prądy w ten sposób, by górna linia prądu zstępującego leżała — powiedzmy — za kartką papieru, a dolna przed kartką i odwrotnie dla prądu wstępującego. Taki trójwymiarowy przepływ (rys. 4) spełnia wszystkie nasze wymagania i wygląda bardzo realistycznie.



Rys. 4

Warto zauważyć, że chmura, którą otrzymaliśmy, ma określoną orientację — lewo lub prawoskrętną; w zależności od tego czy górna linia prądu leży przed, czy za płaszczyzną kartki.

Obserwuje się, szczególnie w Stanach Zjednoczonych, że istotnie niektóre silne burze są prawoskrętne, a inne lewoskrętne. Orientacja burzy jest ważna nie tylko ze względu na kierunek jej ruchu, ale przede wszystkim dlatego, że pierwszy rodzaj łatwo inicjuje tornada, a drugi nie. Tornado mają dużą siłę niszczącą i wczesna wiadomość o ich powstaniu jest dla mieszkańców zagrożonego obszaru niezwykle istotna.

Spróbujmy teraz wyobrazić sobie burzę z rys. 4 obserwowaną na powierzchni Ziemi. Cała rzecz przesuwa się względem niej z lewa na prawo.

Najpierw obserwator znajdzie się w punkcie *A* i zauważy przed sobą delikatną chmurę lodową. Gdy osiągnie on punkt *B*, poczuje lekki wiatr wiejący w kierunku burzy, ponieważ prąd wstępujący pociąga za sobą powietrze z tego kierunku. Chmura lodowa stanie się przy tym grubsza i obserwator zauważy być może pasemka odrywających się od podstawy chmury cząstek.

W punkcie *C* (por. rys. 2) podstawa chmury gwałtownie obniża się, jest ciemna i wygląda bardzo niespokojnie. Ornitolog zauważy, że ptaki unosząc się w prądzie wstępującym polują na małe owady wciągane w ten prąd.

W punkcie *D* spada gwałtowny deszcz i natychmiast potem zaczyna wiać silny wiatr w kierunku ruchu burzy. Na rys. 2 widać, że względem burzy wiatr jest raczej słaby, co oznacza, że jest bardzo silny względem Ziemi.

Następnie nagle się przejaśnia i, jeśli wszystko to dzieje się wieczorem, Słońce świecące z lewej strony naszego rysunku może dać tęczę.

Znajomość mechanizmu wszystkich tych zjawisk może dać dużo satysfakcji, gdy np. obserwujemy, jak dym z kominów zmienia kierunek w miarę zbliżania się burzy i rozumiemy dlaczego tak się dzieje. Poza tym ktoś słuchający w sobotnie popołudnie w Anglii audycji sportowych dowiadując się, że wszystkie mecze krykieta na drodze burzy zostały odwołane, może wyrobić sobie zdanie o wektorze prędkości burzy.

Można także porównać obserwacje tego zjawiska przeprowadzone w różnych miejscach przez odpowiednio poinstruowanych znajomych. Jest to w rzeczywistości ciekawsze niż się wydaje na pierwszy rzut oka, gdyż elektrownie, wzgórza i obszary zabudowane mogą wpływać na zachowanie się takich burz.

A ile radości mamy, gdy przewidując przebieg burzy na podstawie własnych obserwacji przesiedzimy największą ulewę w kawiarni, by po dziesięciu minutach wyjść na zalaną słońcem ulicę.

Odpowiedzi na zadania z artykułu „Lemat Kuratowskiego — Zorna”

1. Wystarczy wziąć $w_n \geq 1/\sqrt{|x_n|}$.
2. Niech V będzie dowolnym ciałem liczbowym. Liczby 0 i 1 należą do V . Łatwo przekonać się (indukcja), że w wymienionym w tekście warunku 1), który ma spełniać każde ciało, można brać sumy dowolnej skończonej liczby składników. Zatem każda liczba naturalna, będąca sumą jedynek, należy do V . Ponieważ $-n = 0 - n$, więc wszystkie liczby całkowite ujemne też należą do V ; wreszcie jeżeli $w = p/q$ jest liczbą wymierną, to z ostatniej zależności w warunku 1) w artykule mamy $w = p/q \in V$. Każda liczba wymierna należy do V , czyli $Q \subset V$.