

Nghiên cứu mô hình Toán học trong khí tượng và dự báo thời tiết

Đoàn Thị Thanh Huyền*, **Nguyễn Ngọc Linh***,
Lê Thị Hương*, **Đàm Thanh Tuấn***

**ThS. Khoa Khoa học đại cương, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội
Received: 08/7/2024; Accepted: 18/7/2024; Published: 25/7/2024*

Abstract: *Weather forecasting is a type of scientific and technological activity. The purpose of weather forecasts is to provide information about expected weather with forecast periods ranging from a few hours to several months. Almost all forecasting techniques applied today involve the use of prediction models based on the application of compressible fluid mechanics equations to the atmosphere. This article provides some Mathematical modeling of weather formation mechanisms and weather patterns using geophysical fluid dynamics methods.*

Keywords: *Mathematical modeling, Weather forecasting.*

1. Đặt vấn đề

Dự báo thời tiết là một loại hoạt động khoa học và công nghệ. Mục đích của dự báo thời tiết là cung cấp thông tin về thời tiết dự kiến với thời gian dự báo từ vài giờ đến vài tháng. Hầu hết tất cả các kỹ thuật dự báo được áp dụng hiện nay đều liên quan đến việc sử dụng các mô hình dự đoán dựa trên việc áp dụng các phương trình cơ học chất lỏng nén vào khí quyển. Các mô hình cung cấp thông tin cần thiết không chỉ cho dự báo thời tiết mà còn cho nhiều ứng dụng khác (hàng không, định tuyến tàu thủy, v.v.). Bài viết này cung cấp một số mô hình hóa toán học các cơ chế hình thành thời tiết và các kiểu thời tiết bằng phương pháp động lực học chất lỏng địa vật lý, các cơ chế khí quyển của sự hình thành và phát triển các kiểu thời tiết ở cả khu vực rộng lớn và các địa điểm cụ thể, tức là các trường khí tượng về nhiệt độ và độ ẩm không khí, gió, mây và lượng mưa.

2. Nội dung nghiên cứu

2.1. Sự hình thành của các kiểu thời tiết

Để hiểu được các kiểu thời tiết được hình thành như thế nào, cần phải giải thích các hiện tượng vật lý đằng sau các quá trình và chuyển động khác nhau của khí quyển. Các quá trình khí tượng phát triển trong khí quyển, một lớp vỏ khí của trái đất, bao gồm nitơ, oxy, hơi nước, axit cacbon, v.v. Khí quyển, một lớp vỏ khí của trái đất, luôn chuyển động và tương tác với bề mặt bên dưới. Trong khí quyển, các quá trình luôn diễn ra, biến đổi năng lượng bức xạ mặt trời thành nhiều dạng năng lượng nhiệt khác nhau và thành năng lượng của các chuyển động, có phổ rất rộng từ các chuyển động ở quy mô hành tinh đến các dao động hỗn loạn biên độ nhỏ của các dòng

khí quyển. Tất cả các quá trình như vậy diễn ra theo ba định luật vật lý cơ bản chi phối tất cả các quá trình địa vật lý: định luật bảo toàn động lượng, khối lượng và năng lượng. Một đặc điểm khác biệt của các quá trình tạo ra thời tiết nằm ở chỗ chúng xuất hiện trên trái đất quay và trong bầu khí quyển phân tầng nhiệt - chất lỏng baroclinic có thể nén được. Bầu khí quyển quay cùng với hành tinh của chúng ta; do đó, trong hệ quy chiếu không quán tính (quay) cố định với trái đất, mọi chuyển động của khí quyển đều chịu tác dụng của một lực làm lệch hướng gọi là lực Coriolis. Lực này ảnh hưởng đến tất cả các hạt không khí chuyển động trong khí quyển và các hạt nước trong đại dương, biển và sông, đồng thời làm thay đổi chuyển động của chúng, phụ thuộc vào vĩ độ và giảm dần theo khoảng cách từ xích đạo. Đặc điểm đặc biệt này của các quá trình trong lớp vỏ không khí và nước của trái đất đã dẫn đến việc tách ngành thủy động lực học và khoa học trái đất thành một nhánh khoa học riêng biệt - động lực học chất lỏng địa vật lý. Tính năng đặc biệt khác của các quá trình khí quyển bao gồm sự xuất hiện của chúng trong chất lỏng phân tầng. Do đó, các dòng khí quyển có tính chất baroclinic, tức là không giống như các dòng khí áp, mật độ không khí trong các dòng khí quyển không chỉ phụ thuộc vào áp suất mà còn phụ thuộc vào nhiệt độ.

Các hiện tượng đặc biệt được nghiên cứu trong động lực học chất lỏng địa vật lý biểu hiện chủ yếu ở các quá trình khí quyển có quy mô tương đương với quy mô hành tinh như bán kính trái đất (khoảng 6000 km). Các quá trình khí quyển ở quy mô này chịu trách nhiệm cho sự hình thành và tiến hóa của

sóng hành tinh và các cơ chế khí quyển liên quan tạo ra các hệ thống thời tiết và kiểu thời tiết trên các khu vực rộng lớn, như lục địa và đại dương.

Các quá trình và chuyển động của khí quyển ở quy mô nhỏ hơn phát triển dựa trên nền tảng của các quá trình quy mô lớn và góp phần hình thành các kiểu thời tiết khu vực và địa phương. Các quá trình này, được gọi là các quá trình khí tượng học, phụ thuộc vào các đặc điểm cục bộ của bề mặt bên dưới như địa hình cục bộ, cảnh quan, suất phản chiếu, v.v. Cuối cùng, các quá trình ở quy mô nhỏ hơn xảy ra và phát triển trên các khu vực nhỏ hoặc trong các lớp khác nhau của khí quyển. Đó là sự đối lưu, sự trộn lẫn hỗn loạn trong lớp ranh giới khí quyển, sự chuyển pha của nước trong không khí và trên bề mặt đất và biển, v.v.

Khám phá và mô hình hóa toán học các cơ chế hình thành thời tiết và các kiểu thời tiết bằng phương pháp động lực học chất lỏng địa vật lý cho thấy nguyên nhân chính của sự diễn biến thời tiết có liên quan đến sự xuất hiện, diễn biến của các xoáy khí quyển quy mô lớn và cả thời gian tồn tại của chúng. Những nhiễu loạn khí quyển quy mô lớn được bổ sung thêm các xoáy chuyển động nhanh ở quy mô nhỏ hơn như lốc xoáy nhiệt đới (bão, cuồng phong). Những xoáy này (mô hình hóa và dự báo của chúng cũng nằm trong phạm vi của bài này) có thể phát triển năng lượng và gió rất lớn; đây là nguyên nhân chính gây ra mối đe dọa đặc biệt lớn của chúng đối với tính mạng con người và gây thiệt hại về tài sản.

2.2. Hệ phương trình dùng trong mô hình khí quyển thủy động lực học

2.2.1. Công thức chung

Công thức toán học của các mô hình khí quyển được sử dụng để dự báo thời tiết dựa trên các phương trình cơ học của chất lỏng có thể nén, xuất phát từ ba định luật cơ bản: định luật động lượng và bảo toàn khối lượng và định luật thứ nhất của nhiệt động lực học. Ba định luật này lần lượt đưa ra các phương trình chuyển động, phương trình liên tục và phương trình năng lượng nhiệt động lực học (hoặc phương trình truyền nhiệt - biến đổi). Biểu diễn trong hệ tọa độ có định với trái đất quay nên phương trình chuyển động trong không gian ba chiều có thể viết dưới dạng:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} - 2\vec{\omega} \times \vec{V} - \text{grad} U + \vec{D}$$

trong đó \vec{V} là vectơ vận tốc, d/dt là ký hiệu của đạo hàm toàn phần theo thời gian, ρ là mật độ, p là áp suất, $\vec{\omega}$ là vectơ vận tốc góc quay của trái đất,

U là thế năng của lực hấp dẫn và \vec{D} là vectơ biểu thị lực tiêu tán.

Phương trình liên tục có dạng: $\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div} \vec{V} = 0$

và phương trình năng lượng nhiệt động được xây dựng là: $\rho \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T} \varepsilon$ trong đó s là entropy của hạt, T là nhiệt độ, và ε là tốc độ nhiệt được thêm vào đơn vị khối không khí do các nguồn năng lượng bên ngoài (không đoạn nhiệt); đó là: năng lượng mặt trời và bức xạ nhiệt, trao đổi nhiệt hỗn loạn và biến đổi pha của độ ẩm khí quyển. Vì khí quyển được coi là khí lý tưởng nên entropy được biểu diễn dưới dạng: $s = C_v \ln(p/\rho^\kappa) + \text{const}$ trong đó κ là tỷ số giữa các hệ số nhiệt dung riêng, thể tích không khí ở áp suất không đổi và thể tích không đổi. T được liên kết với p và ρ với phương trình trạng thái Boyle-Charles của khí lý tưởng: $p = R\rho T$. Trong đó R là khí không đổi đối với không khí khô (không bão hòa). Các phương trình trên được bổ sung thêm phương trình truyền độ ẩm riêng q , $\frac{dq}{dt} = Q$, trong đó Q mô tả cả sự khuếch tán hỗn loạn của độ ẩm và sự giải phóng nước dưới dạng mưa.

Trong tọa độ Descartes các biến x , y và z các phương trình trên là:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fu - f_1 w$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu; \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{d \ln(p/p^k)}{dt} = 0$$

Trong đó u , v , w là các thành phần vận tốc theo các hướng x , y , z , f là Coriolis; tham số $f = 2\omega \sin\varphi$; $f_1 = 2\omega \cos\varphi$; g là lực hấp dẫn hướng lên trên của lực gia tốc, φ là vĩ độ và

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} + v \frac{\partial \psi}{\partial y} + w \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

$$\text{với } [\psi = u; v; w; \rho; \ln(P/\rho^k)]$$

2.2.2. Quan hệ thủy tĩnh

Một điểm quan trọng trong việc áp dụng các phương trình trên vào dự báo thời tiết nằm ở việc đánh giá độ lớn đặc trưng của các số hạng cụ thể của chúng. Theo kinh nghiệm, các chuyển động của khí quyển quyết định cơ chế tạo ra thời tiết tập trung ở tầng khí quyển thấp hơn với độ sâu thẳng đứng khoảng 10-20 km. Nhưng phạm vi theo chiều ngang của các quá trình khí quyển rất khác nhau và có thể dao động từ vài trăm mét (gió địa phương, gió thung lũng núi, mây núi, v.v.) đến vài nghìn km (xoáy, áp thấp, hệ thống hoàn lưu gió mùa, v.v.).

Đặc biệt, các kiểu thời tiết quy mô lớn có liên quan

đến các chuyển động của khí quyển có quy mô cỡ 1000 km, tức là quy mô ngang của các hiện tượng liên quan lớn hơn ít nhất mười lần quy mô dọc của chúng. Như đã thấy rõ từ phương trình liên tục, trong trường hợp này, vận tốc thẳng đứng đặc trưng, W , có cùng tỷ lệ so với vận tốc ngang đặc trưng, U , giống như thang đo dọc đặc trưng của hiện tượng, H , liên quan đến thang đo ngang đặc trưng, tức là $W/U \approx H/L$

Thời gian đặc tính t_1 có thể lấy là $t_1 = L/U$ (hoặc $t_1 = H/W$). Điều này có nghĩa là tốc độ lan truyền của một hiện tượng được giả định là giống như tốc độ chuyển động của không khí, điều này hiểu rằng sự lan truyền của nhiễu loạn khí quyển không thể hiện các đặc tính của một quá trình mà tốc độ lan truyền của nó lớn hơn đáng kể so với tốc độ truyền của không khí. các hạt, chẳng hạn như trường hợp truyền sóng âm. Nếu $U = 10 \text{ m/s}$, $H/L = 0,1$ và $H = 10 \text{ km}$ thì mỗi số hạng ở vế trái của phương trình chuyển động theo phương thẳng đứng có bậc $U^2H/L^2 \approx 10^{-4} \text{ m/s}^2$ nhỏ hơn gấp 10^4 lần ở vế phải của nó. Do đó, phương trình này chỉ đơn giản phát biểu rằng gia tốc trọng trường, g , gần như cân bằng chính xác với gia tốc do gradient thẳng đứng của áp suất khí quyển (hoặc áp suất khí quyển).

$\rho^{-1}\partial p/\partial z$ và có thể được thay thế bằng thủy tĩnh (hoặc bán tĩnh) mối quan hệ $-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + g = 0$ cho một loạt các quá trình khí quyển tạo ra thời tiết. Tuy nhiên, mối quan hệ này không được đáp ứng ngay cả khi tỷ lệ dọc và ngang của một số hiện tượng thời tiết có cùng độ lớn. Do đó, việc mô hình hóa các hiện tượng thời tiết địa phương nhất định đòi hỏi phải sử dụng phương trình chuyển động hoàn chỉnh (không đơn giản hóa) theo hướng thẳng đứng. Hiện tượng khí quyển thuộc loại này được dự đoán với các mô hình khí quyển quy mô trung bình không được nhắc đến ở đây

2.2.3. Hệ phương trình trong tọa độ áp suất

Quan hệ tọa độ cung cấp một phương tiện để đưa các phương trình dự báo được sử dụng để dự đoán các kiểu khí quyển quy mô lớn thành một dạng đơn giản hơn dựa trên tọa độ áp suất được phát triển bởi Eliassen (1948). Trong hệ tọa độ áp suất, tọa độ x, y thông thường biểu thị vị trí của một điểm được chiếu trong mặt phẳng nằm ngang, nhưng áp suất p biểu thị vị trí của nó dọc theo trục thẳng đứng. Đạo hàm “ngang” của một biến là các hiệu của nó từ điểm này đến điểm khác trên cùng một mặt đẳng áp đối với các hiệu tương ứng trong mặt phẳng ngang. Đạo hàm “dọc” của một biến là đạo hàm của nó theo áp suất, nhưng hướng dọc theo phương thẳng đứng.

Trong tọa độ áp suất, áp suất p trở thành một trong các biến độc lập, chiều cao z của một bề mặt đẳng áp cụ thể trở thành một biến phụ thuộc và vai trò của tốc độ không khí theo phương thẳng đứng w được đảm nhận bởi ω , đạo hàm tồn tại của áp suất theo thời gian $\omega = dp/dt$

Các phương trình chuyển động theo phương nằm ngang, phương trình thủy tĩnh, phương trình liên tục và phương trình năng lượng nhiệt động theo tọa độ p là:

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + fv; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial z}{\partial y} - fu$$

$$T = -\frac{gp}{R} \frac{\partial z}{\partial p}; \quad \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

$$\text{Và } \frac{dT}{dt} - \frac{k-1}{k} \frac{T}{p} \omega = 0$$

ở đây $\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} + v \frac{\partial \psi}{\partial y} + \omega \frac{\partial \psi}{\partial p}$; ($\psi = u; v; T$)

Mối quan hệ giữa w và ω là:

$$w = \frac{\partial z}{\partial t} + U \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\omega}{gp} \approx -\frac{\omega}{gp}$$

Phương trình đặt ở tọa độ p đơn giản hơn phương trình ban đầu. Như vậy, các phương trình của chuyển động và phương trình liên tục giống với các phương trình tương tự của chất lỏng không nén được. Ngoài ra, khi xây dựng biểu đồ trên không trong thực hành khí tượng, chỉ p được sử dụng làm biến độc lập và chiều cao z của bề mặt đẳng áp là chức năng đang được phân tích. Cùng với những sửa đổi tiếp theo nhằm mục đích xử lý thuận tiện các tác động cứu trợ, tọa độ p được sử dụng rộng rãi cho các tác động địa tĩnh và phi địa chất, mô hình địa tĩnh hiện nay để dự đoán các kiểu thời tiết quy mô lớn.

3. Kết luận

Khám phá và mô hình hóa toán học các cơ chế hình thành thời tiết và các kiểu thời tiết bằng phương pháp động lực học chất lỏng địa vật lý cho thấy nguyên nhân chính của sự diễn biến thời tiết có liên quan đến sự xuất hiện, diễn biến của các xoáy khí quyển quy mô lớn và cả thời gian tồn tại của chúng. Nguyên lý và phương pháp của mô hình nhiễu loạn địa vật lý được sử dụng rộng rãi trong các mô hình toán học dự báo thời tiết.

Tài liệu tham khảo

1. Berkovich L.V., Tarnopol'skiy A.G., and Shnaidman V.A. (1997). *A hydrodynamic model of atmospheric and oceanic boundary layers*. Russian Meteorology and Hydrology, No.7, 30-40.
2. Gordin V.A. (2000). *Mathematical Problems and Methods in Hydrodynamic Weather Forecasting*, 842 pp., 1150 refs. Gordon and Breach Sci. Publ.; Australia, Canada, China etc.