

# ỨNG DỤNG CÁC LOẠI MÔ HÌNH SỐ DỰ BÁO BÃO Ở VIỆT NAM

ThS. Lê Công Thành

Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn Trung ương

Dự báo số trị đã trải qua một giai đoạn phát triển tương đối dài và hiện nay đã đạt đến trình độ rất cao. Để dự báo bão, hiện có nhiều loại mô hình khác nhau, từ đơn giản đến phức tạp, đã và đang được nghiên cứu áp dụng trên thế giới và ở nước ta. Các kiến thức về khả năng dự báo của từng loại mô hình là rất cần thiết cho việc sử dụng và phát triển các mô hình này một cách hiệu quả. Với mục đích như vậy, bài báo này phân tích một cách hệ thống các loại mô hình số dự báo bão để thấy được các ưu, nhược điểm xét trên phương diện lý thuyết cũng như thực tế sử dụng của từng loại mô hình. Mặt khác, một số đặc điểm riêng của các mô hình số dự báo bão so với các mô hình số dự báo thời tiết nói chung cũng được phân tích nhằm làm rõ những điều dễ gây nhầm lẫn khi xem xét hai khái niệm có nhiều điểm trùng nhau này.

Trong nghiên cứu này, song song với việc phân tích trên phương diện lý thuyết, một số mô hình số dự báo bão hiện có ở Việt Nam (mô hình chính áp WBAR<sup>1</sup>, mô hình nước nông-ba lớp DR97<sup>2</sup> và mô hình phân giải cao HRM<sup>3</sup>) được nghiên cứu cải tiến theo nhiều hướng khác nhau nhằm đánh giá khả năng dự báo của các loại mô hình trong trường hợp quỹ đạo bão có sự chuyển hướng. Các kết quả dự báo bằng các loại mô hình bộc lộ những khả năng dự báo khác nhau trong các trường hợp cụ thể khác nhau. Nghiên cứu để hiểu rõ các đặc tính này sẽ là rất hữu ích cho việc sử dụng kết quả dự báo và giúp cho việc định hướng cải tiến mô hình trở thành rõ ràng và hiệu quả hơn.

## Mở đầu

Theo nhận định của Hội nghị Quốc tế về bão do Tổ chức Khí tượng Thế giới tổ chức năm 2002 tại Darwin, Australia, kỹ năng dự báo đường đi của bão của các mô hình số trên thế giới đã đạt đến trình độ tương đối cao, đáp ứng được yêu cầu của dự báo nghiệp vụ và vẫn tiếp tục được nghiên cứu sâu hơn [15]. Những thành quả này đạt được là do:

- 1) sử dụng tốt hơn các quan trắc để xác định môi trường xung quanh bão;
- 2) sự phát triển liên tục của các mô hình, đặc biệt là sự cải tiến các tham số hóa vật lý;
- 3) các hệ thống dự báo có độ phân giải cao hơn ;
- 4) sử dụng một số phương pháp ban đầu hóa xoáy bão.

<sup>1</sup> WBAR là mô hình chính áp dự báo bão được phát triển bởi Weber [22].

<sup>2</sup> DR97 là mô hình mô phỏng nghiên cứu bão gồm 3 lớp khí quyển, được phát triển bởi Dengler và sử dụng để nghiên cứu trong [18].

<sup>3</sup> HRM là mô hình dự báo thời tiết khu vực phân giải cao, được xây dựng và phát triển tại Trung tâm Khí tượng CHLB Đức.

Ở nước ta, vấn đề dự báo bão vẫn luôn là một là một trọng tâm của công tác dự báo thời tiết và không ngừng đòi hỏi các nghiên cứu và thử nghiệm nhằm nâng cao chất lượng dự báo. Tuy nhiên, việc áp dụng các mô hình số dự báo thời tiết nói chung và bão nói riêng mới thực sự được phát triển mạnh mẽ trong thời gian gần đây do được quan tâm đầu tư về cơ sở hạ tầng kỹ thuật cũng như về công nghệ dự báo. Là kết quả của sự hợp tác ba bên giữa Cơ quan Khí tượng Đức (DWD), Trường Đại học Khoa học Tự nhiên và Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Trung ương, mô hình thời tiết phân giải cao HRM đã được đưa vào dự báo nghiệp vụ từ năm 2002 [3]. Bên cạnh đó, mô hình chính áp BARO cũng được thử nghiệm nghiệp vụ dự báo bão [6]. Ngoài ra, trong nghiên cứu này, chúng tôi cũng thực hiện thử nghiệm mô hình chính áp WBAR của Weber [22] và mô hình nước nông ba lớp của Dengler và Reeder [18] để nghiên cứu một số khía cạnh trong việc ứng dụng của các mô hình tương đối đơn giản này.

Có thể nhận thấy rằng số lượng các mô hình số dự báo bão ở nước ta còn rất khiêm tốn so với các trung tâm dự báo lớn trên thế giới. Ví dụ như Trung tâm Quốc gia Dự báo Bão Hoa Kỳ (NHC) có khoảng 15 mô hình trợ giúp dự báo bão nghiệp vụ bao gồm từ các sơ đồ thống kê quán tính và khí hậu (CLIPER, NHC90, NHC91), một số các mô hình chính áp đơn giản (LBAR, BAM), mô hình hệ phương trình nguyên thủy được thiết kế đặc biệt cho dự báo bão (GFDL, GFDI) và các mô hình toàn cầu (AVN, NOGAPS, UKMET) [17]. Hơn nữa, các mô hình này đã được sử dụng trong một thời gian khá dài và do đó khả năng dự báo của chúng đã được hiểu biết khá rõ. Đây là một ví dụ đặc biệt vì Hoa Kỳ đã có một quá trình phát triển dự báo số rất dài, tuy nhiên, việc sử dụng các mô hình cũng đã trở thành một qui trình cơ bản trong công tác dự báo bão nghiệp vụ ở phần lớn các trung tâm dự báo trên thế giới.

Vì vậy, trong giai đoạn đầu triển khai sử dụng các mô hình số ở nước ta hiện nay, sự hiểu biết về khả năng dự báo của từng loại mô hình là rất cần thiết để lựa chọn sử dụng và nghiên cứu phát triển chúng một cách hợp lý. Đó cũng chính là vấn đề được trình bày và phân tích trong bài này.

Theo tính chất của hệ phương trình cũng như lịch sử phát triển, có thể phân loại các mô hình số thành ba nhóm lớn là

- a) các mô hình lọc (filtered models),
- b) các mô hình nước nông
- c) các mô hình dùng hệ phương trình nguyên thủy đầy đủ.

Các định nghĩa cơ bản và vấn đề ứng dụng cho dự báo bão của từng loại mô hình sẽ được trình bày trong phần 1. Các kết quả thử nghiệm với từng loại mô hình được trình bày trong phần 2. Bài báo này không nhằm mục đích tổng quan về sự phát triển, hoặc đi sâu vào mô tả chi tiết từng loại mô hình, mà chỉ xem xét khía cạnh ứng dụng vào công tác dự báo bão.

## **1. Các mô hình số dự báo bão**

### **a. Các mô hình lọc**

Loại mô hình này được xây dựng trên cơ sở phương trình xoáy. Các mô hình tựa địa chuyển và tựa solenoid thuộc lớp mô hình này<sup>4</sup>. Thuật ngữ “lọc” được sử dụng

---

<sup>4</sup> Về bản chất toán học, mô hình tựa địa chuyển và tựa solenoid là tương tự nhau, chúng cùng lấy phương trình xoáy làm cơ bản và sử dụng giả thiết tựa địa chuyển để liên hệ giữa trường áp và trường gió. Điểm khác nhau là ở chỗ: mô hình tựa địa chuyển sử dụng số liệu đầu vào là độ cao địa thế vị, trong khi mô hình tựa solenoid sử dụng trường đường dòng[24],

ở đây vì các sóng quán tính trọng trường đã được loại bỏ khỏi hệ phương trình của mô hình do có sử dụng quan hệ địa chuyển để liên hệ giữa gió và độ cao địa thế vị [19]. Do đó, các mô hình loại này chỉ thể hiện sự lan truyền của các sóng chậm như sóng Rossby (gây ra các hệ thống thời tiết qui mô Synop). Do sự đơn giản, đòi hỏi khả năng tính toán và xử lý số tối thiểu, đây chính là những mô hình đã thực hiện dự báo thành công đầu tiên trong lịch sử dự báo số [11].

Trong các mô hình lọc, thành phần phân kỳ của trường gió có thể được giả thiết là không đáng kể (các mô hình không phân kỳ), hoặc được tính đến (mô hình phân kỳ); mô hình có thể là chính áp (một mực) hoặc tà áp (nhiều mực). Trong số đó, mô hình chính áp không phân kỳ cho *khí quyển tương đương*<sup>5</sup> là một trong những dạng đơn giản và được sử dụng rộng rãi, đặc biệt là cho dự báo bão. Được viết cho một mực không phân kỳ, mô hình loại này tuân theo định luật bảo toàn xoáy tuyệt đối.

$$\frac{d}{dt} \zeta_a = 0 \quad (1)$$

Như vậy, xoáy tuyệt đối của một phân tử khí không thay đổi. Hay nói một cách khác, nếu khí quyển được coi là một lớp hay một mặt không phân kỳ, sự biến đổi của xoáy tuyệt đối tại một điểm sẽ chỉ phụ thuộc vào bình lưu ngang của nó. Bão được thể hiện trong trường độ xoáy là nơi có độ xoáy xoáy thuận lớn và do đó, sự di chuyển của bão mà mô hình mô phỏng được là kết quả của các quá trình bình lưu của xoáy tuyệt đối trên mặt đó. Mực được sử dụng để xem xét các quá trình bình lưu xoáy được gọi là mực dòng dẫn. Trên thực tế, bên cạnh việc sử dụng mực khí quyển tương đương, các mực đẳng áp 500mb hay 700mb cũng có thể được sử dụng làm mực dòng dẫn. Lưu ý rằng, bình lưu xoáy không những chỉ thể hiện ở việc vận chuyển xoáy bão bởi dòng dẫn mà còn ở ảnh hưởng phi đối xứng sinh ra do tương tác của hoàn lưu xoáy bão với gradien xoáy tuyệt đối của môi trường (hiệu ứng beta).

Mặc dù thể hiện được ảnh hưởng của các quá trình động lực qui mô lớn đối với đường đi của bão, các mô hình loại này lại không mô tả được các quá trình quan trọng khác như các quá trình nhiệt động lực qui mô vừa và nhỏ của chính khu vực bão phát triển cũng như tương tác giữa chúng với môi trường xung quanh. Tác động tổ hợp phức tạp của các lực này khiến cho bão chuyển động lệch khỏi dòng dẫn. Điều đó giải thích tại sao ngày nay, các mô hình loại này thường không được dùng trong dự báo nghiệp vụ nữa, thay vào đó là các mô hình phức tạp hơn, có mô phỏng cả sự lan truyền các sóng quán tính trọng trường cũng như các quá trình vật lý gắn với khí quyển thực hơn.

### **b. Các mô hình nước nông**

Các mô hình nước nông dựa trên hệ phương trình Navie-Stokes đã được trung bình hoá một phần hay toàn bộ với giả thiết là qui mô ngang lớn hơn qui mô thẳng đứng rất nhiều và thỏa mãn điều kiện cân bằng thủy tĩnh. Dạng đơn giản nhất của hệ phương trình nước nông cho một lớp chất lỏng không nén được trong điều kiện thủy tĩnh gồm phương trình chuyển động:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = f\vec{k} \times \vec{V} - \nabla h \quad (2)$$

và phương trình liên tục:

<sup>5</sup> *khí quyển tương đương* được sử dụng trong các mô hình chính áp là lớp khí quyển có các trường dòng và bề dày tương đương với giá trị trung bình (theo phương thẳng đứng) của khí quyển thực.

$$\frac{dh}{dt} = -h\nabla \cdot \vec{V} \quad (3)$$

trong đó  $\vec{V}$  là vectơ vận tốc gió,  $h$  là bề dày của lớp chất lỏng,  $f$  là tham số Coriolis. Từ hệ phương trình (2-3) có thể chứng minh sự bảo toàn xoáy thế trong mô hình này:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\zeta_a}{h} \right) = 0, \quad (4)$$

trong đó, xoáy tuyệt đối không bảo toàn mà có thể biến đổi tương ứng với độ dày của lớp để bảo đảm xoáy thế ( $q = \zeta_a / h$ ) không đổi. Nhờ đó, mô hình loại này có thể mô tả được phần nào sự biến đổi cường độ của xoáy thông qua độ hội tụ hay phân kỳ ngang (tương ứng với sự dãn ra hay nén lại theo phương thẳng đứng) của lớp khí quyển. Hơn nữa, do hệ phương trình nước nông không loại bỏ các sóng quán tính trong trường như ở các mô hình lọc, các quá trình liên quan đến sự lan truyền nhanh của các sóng này vẫn được mô phỏng. Mô hình nước nông có thể là hai chiều (một lớp) hoặc ba chiều (nhiều lớp).

#### 1) Các mô hình nước nông hai chiều<sup>6</sup>

Các mô hình nước nông hai chiều mô tả một lớp khí quyển với các tính chất trung bình hoá (theo phương thẳng đứng) cho lớp đó. Do đặc tính bảo toàn xoáy thế, mô hình loại này còn thể hiện được phần nào ảnh hưởng của địa hình thông qua sự thay đổi độ dày lớp khí quyển từ mặt đất đến đỉnh khí quyển của mô hình. Mặc dầu vậy, đây vẫn là mô hình chính áp vì giả thiết khí quyển là một lớp đồng nhất theo phương thẳng đứng.

Do ảnh hưởng của các quá trình chính áp đến sự di chuyển của bão là tương đối đáng kể (chiếm khoảng 70% các trường hợp) nên các mô hình chính áp loại này vẫn đang được sử dụng trong dự báo bão. Trên thực tế, khi cơn bão nằm trong môi trường có độ chính áp lớn (ví dụ như ở rìa phía nam của hệ thống cao áp cận nhiệt đới<sup>7</sup>), các mô hình chính áp loại này cũng có thể cho dự báo tương đối tin cậy.

Hơn nữa, với ưu điểm gọn nhẹ, cho phép tính toán nhanh, mô hình nước nông hai chiều vẫn được sử dụng cho dự báo bão nghiệp vụ, ngay cả ở Trung tâm Dự báo Bão Hoa kỳ (mô hình LBAR được sử dụng nghiệp vụ tại các Trung tâm Dự báo Bão ở Miami và Honolulu). Một lợi thế khác của cấu trúc một lớp đơn giản là ta có thể dễ dàng hiệu chỉnh trường ban đầu sao cho xoáy bão trong mô hình có chuyển động ban đầu tương ứng với chuyển động của xoáy bão thực, điều khó có thể thực hiện được với các mô hình phức tạp, nhiều tầng. Sự hiệu chỉnh tuy đơn giản này lại làm tăng đáng kể độ chính xác của dự báo quỹ đạo bão. Vấn đề này sẽ được nói đến thêm trong phần 1.4.

Tuy nhiên, các mô hình loại này vẫn không thể tránh khỏi các nhược điểm cố hữu của mô hình chính áp là không mô tả được các quá trình phi chính áp như ảnh hưởng của độ đứt gió thẳng đứng, các quá trình vận chuyển và xáo trộn thẳng đứng, cũng như các quá trình phi đoạn nhiệt (ma sát bề mặt, đối lưu). Như vậy, khi cơn bão chịu ảnh hưởng của các hệ thống có độ tà áp lớn như dưới dòng xiết trên cao hoặc các hệ thống sóng tà áp (ví dụ như nhiễu động sóng trong trường gió tây trên cao), cấu

<sup>6</sup> Một số tác giả gọi mô hình loại này là phiên bản chính áp của mô hình hệ phương trình nguyên thủy do sử dụng hệ phương trình Navie-Stokes.

<sup>7</sup> Cao áp cận nhiệt đới có thể được coi là hệ thống có tính chính áp lớn vì nó có cấu trúc thẳng đứng tương đối đồng nhất và xoáy gần hết tầng đối lưu.

trúc thẳng đứng không đồng nhất của các hệ thống này sẽ không được mô tả trong mô hình nước nông hai chiều (do phép lấy trung bình theo phương thẳng đứng hoặc do hệ thống nhiều động tã áp đó không được thể hiện trên mực đẳng áp được chọn làm đỉnh khí quyển của mô hình).

## 2) Các mô hình nước nông ba chiều

Với cấu trúc thẳng đứng gồm nhiều lớp được giả thiết là có tính chất đồng nhất (ví dụ như mật độ, nhiệt độ địa thế vị) chồng lên nhau, các mô hình nước nông ba chiều có thể phân nào mô tả được cấu trúc thẳng đứng của khí quyển và các quá trình vật lý liên quan như vận chuyển và trao đổi rối thẳng đứng, đối lưu, ma sát. Tuy nhiên, các quá trình trao đổi thẳng đứng thường được tham số hóa thông qua sự trao đổi (khối lượng, động lượng) giữa các lớp thay vì có sự mô tả rõ về cơ chế chuyển đổi giữa động năng và thế năng và do đó khó có thể mô tả sự chuyển đổi năng lượng trong mô hình sát với thực tế.

Dựa trên sự khởi đầu thành công của Ooyama [21] trong việc mô phỏng quá trình phát triển của bão, một loạt các mô hình khác thuộc loại này được phát triển và sử dụng rộng rãi ([16], [18], [23]) nhằm mục đích nghiên cứu các khía cạnh khác nhau ảnh hưởng đến đường đi và phát triển của xoáy bão. Các mô hình này thường được sử dụng với xoáy bão ban đầu và trường môi trường theo một kịch bản mô phỏng nào đó thay vì sử dụng số liệu thực. DR97 nguyên bản là một mô hình thuộc loại này. Với cấu trúc có thể là tối thiểu để mô tả hoàn lưu thẳng đứng của bão, các mô hình này đã giúp các nhà nghiên cứu một cách đặc lực trong việc tìm hiểu các quá trình động lực ảnh hưởng đến sự di chuyển và phát triển của bão, điều khó bóc tách rõ ràng trong các mô hình hệ phương trình nguyên thủy có nhiều tương tác phức tạp giữa các quá trình phi tuyến.

## 3) Các mô hình hệ phương trình nguyên thủy

Các mô hình này cũng sử dụng hệ phương trình Navie-Stokes cho các mực (đại diện cho các lớp) thay vì cho các tính chất trung bình hóa của các lớp đồng nhất (như ở các mô hình nước nông). Do đó, những hạn chế của mô hình nước nông được loại bỏ, các quá trình nhiệt động học mô tả sự chuyển đổi năng lượng có thể được mô tả rõ. Giống như các mô hình nước nông nói trên, mô hình loại này cũng cho phép sự lan truyền của các sóng trọng trường. Mô hình hệ phương trình nguyên thủy có thể là thủy tĩnh, trong đó sự lan truyền sóng âm được loại bỏ thông qua việc sử dụng quan hệ thủy tĩnh và vận tốc thẳng đứng được chẩn đoán từ các biến khác thay vì được dự báo bằng phương trình xu thế. Còn trong các mô hình phi thủy tĩnh, sự lan truyền của sóng âm được cho phép và vận tốc thẳng đứng trở thành biến dự báo. Các mô hình thủy tĩnh thường có độ phân giải ngang lớn hơn 10km, trong khi những mô hình có độ phân giải nhỏ hơn mức này thường phải là loại phi thủy tĩnh để mô phỏng xác thực hơn các quá trình xảy ra ở qui mô nhỏ như vậy.

Các mô hình hệ phương trình nguyên thủy liên tục được nghiên cứu cải tiến và trở nên ngày càng phức tạp hơn với các quá trình vật lý khác nhau được mô phỏng như đối lưu, rối, bức xạ, các quá trình tương tác giữa khí quyển và bề mặt. Nhờ đó, chúng có thể đưa ra dự báo không chỉ đường đi và cường độ của bão mà cả các yếu tố quan trọng khác ảnh hưởng đến đời sống, kinh tế xã hội như lượng mưa và vùng mưa gây nên do bão hay do ảnh hưởng của bão kết hợp với các hệ thống thời tiết khác.

Theo miền dự báo, có thể phân các mô hình loại này thành mô hình toàn cầu và mô hình lãnh thổ giới hạn. Các mô hình toàn cầu đòi hỏi phải có hệ thống thu thập số liệu toàn cầu, hệ thống phân tích số liệu tốt để làm đầu vào cho mô hình và cuối cùng

là khả năng tính toán nhanh để đưa ra kết quả dự báo kịp thời. Trong số các mô hình toàn cầu hàng đầu thế giới hiện nay về dự báo bão phải kể đến mô hình của Trung tâm Dự báo Thời tiết Hạn vừa Châu Âu (ECMWF), mô hình AVN và NOGAPS của Hoa Kỳ, mô hình UKMET của Khí tượng Anh, mô hình GSM của Nhật. Đối với các mô hình lãnh thổ hạn chế, cần thiết phải có thêm điều kiện biên, thường là lấy từ dự báo của mô hình toàn cầu. Hiện nay, có thể coi mô hình GFDL [20] chỉ dùng để dự báo bão của Phòng Thí nghiệm Động lực Chất lỏng Địa vật lý của Hoa Kỳ là mô hình phức tạp và hiện đại nhất thuộc loại này.

Các mô hình dự báo lãnh thổ hạn chế đang được sử dụng ở nước ta hiện nay bao gồm: HRM, MM5, WRF và ETA. Trong số đó, mô hình HRM được chạy nghiệp vụ từ năm 2002 và ETA đang được bắt đầu thử nghiệm ở Trung tâm Dự báo khí tượng thuỷ văn Trung ương [7]. Tất cả các mô hình này đều nhận số liệu đầu vào và điều kiện biên từ một mô hình toàn cầu nào đó (HRM sử dụng số liệu của mô hình toàn cầu GME của CHLB Đức, các mô hình còn lại đều sử dụng số liệu từ mô hình AVN của Hoa Kỳ).

#### *d) Đặc trưng riêng của các mô hình dự báo bão*

Vậy thì điều gì làm nên sự khác biệt của các mô hình dự báo bão so với các mô hình dự báo thời tiết nói chung? Một mô hình dự báo thời tiết có thể được sử dụng để dự báo bão được không? Câu trả lời sẽ là “hoàn toàn có thể” nếu như số liệu đầu vào là đủ dày và hoàn toàn chính xác để mô tả được xoáy bão, mô hình có độ phân giải cao và “hoàn hảo” trong việc mô phỏng các quá trình vật lý trong khí quyển. Tuy nhiên, cho đến nay điều này vẫn chưa là hiện thực. Do đó, để nâng cao chất lượng dự báo bão trong các điều kiện về số liệu, mô hình và khả năng tính toán như hiện nay, hai giải pháp được sử dụng tương đối phổ biến là xử lý trường ban đầu sao cho xoáy bão có vị trí và cấu trúc gần thật nhất (phương pháp cài xoáy); và sử dụng các lưới lồng có độ phân giải cao chuyển động theo bão nhằm nâng cao độ phân giải của mô hình trong vùng có bão mà không quá tốn kém công suất tính toán cho toàn miền dự báo.

Các thủ tục cài xoáy hay ban đầu hoá xoáy bão thường bao gồm các bước cơ bản là: loại bỏ xoáy trong trường phân tích ban đầu (được coi là có vị trí và cường độ không đúng) và cài một xoáy nhân tạo có vị trí và cường độ gần với quan trắc (sử dụng ảnh vệ tinh hay các nguồn số liệu khác). Ở nước ta đã có một số bài báo đề cập đến phương pháp cài xoáy cho mô hình chính áp ([2], [8] và [10]). Một số nhận xét hữu ích về ảnh hưởng của ban đầu hoá xoáy bão đến kết quả dự báo cho một số cơn bão đã được đưa ra. Tuy nhiên, để có được phương pháp cài xoáy bão tổng quát cho các cơn bão luôn có bản chất khác nhau, các nghiên cứu và thử nghiệm một cách hệ thống hơn là rất cần thiết trong thời gian tới.

Đối với mô hình phức tạp bao gồm nhiều lớp khí quyển và có mô phỏng các quá trình liên quan đến âm, việc cài xoáy ban đầu lại càng trở nên phức tạp hơn do số liệu hầu như không đủ cho việc mô tả cấu trúc thẳng đứng của xoáy bão. Nếu như phần xoáy bão đối xứng có thể được mô tả tương đối tốt bởi một số công thức thực nghiệm, việc mô phỏng thành phần phi đối xứng là rất khó khăn và các thử nghiệm thường cho các kết quả khác nhau ([2], [14]), thể hiện sự không hoàn chỉnh của phương pháp. Đối với các mô hình nhiều tầng, điều này càng trở nên quan trọng do các trường trên cao thường thể hiện độ bất đối xứng lớn và chính nó có ảnh hưởng lớn tới sự đổi hướng và thay đổi cường độ của bão.

Ngoài ra, sau khi đã cài xong xoáy bão nhân tạo vào mô hình hay cho thêm số liệu quan trắc, cần thiết phải tiến hành việc ban đầu hóa mô hình tức là làm cho số liệu mới cho thêm vào trở nên hòa hợp với nhau và không tạo nên các nhiễu động giả bị khuếch đại nhanh trong quá trình tích phân, đồng thời đảm bảo rằng các thông tin này không bị “đào thải”<sup>\*</sup> trong quá trình tích phân.

Việc sử dụng lưới lồng với các lưới nhỏ bên trong di chuyển theo tâm bão có lẽ là một vấn đề tồn tại lịch sử nhằm mô phỏng xoáy bão tinh hơn trong khi khả năng tính toán trước đây còn nhiều hạn chế. Trên thực tế, lưới tinh nhất của mô hình bão GFDL có độ phân giải khoảng 18 km. Độ phân giải này trên thực tế là rất thô so với các mô hình lãnh thổ hạn chế tiên tiến nhất hiện nay. Với tốc độ phát triển nhanh như hiện nay của các loại máy tính tốc độ cao, có lẽ việc sử dụng giải pháp này trong tương lai sẽ là không cần thiết nữa vì bản thân sự tương tác giữa các lưới với nhau cũng tạo nên các sai số nhất định.

Một khía cạnh khác có thể phát triển riêng cho mô hình bão là việc mô phỏng các quá trình vật lý xảy ra trong bão, đặc biệt là đối lưu trong các đám mây tích của tầng mây mắt bão và các quá trình trao đổi thông lượng bề mặt trong điều kiện gió bề mặt rất lớn trong bão. Tham số hoá đối lưu trong bão vẫn luôn là đề tài thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Tuy nhiên, với viễn cảnh là độ phân giải của mô hình tăng lên cùng với tốc độ tính toán, các quá trình đối lưu sẽ được thể hiện rõ trong mô hình. Và do đó, trọng tâm sẽ được chuyển sang tham số hoá các quá trình vi vật lý xảy ra trong các đám mây đặc trưng của bão.

## 2. Thử nghiệm dự báo bão bằng các mô hình số

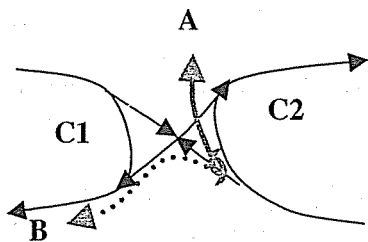
Với hiểu biết chi tiết về ba mô hình dự báo số (WBAR, DR97 và HRM) đại diện cho các lớp mô hình dự báo bão có độ phức tạp khác nhau như trên, bước tiếp theo trong nghiên cứu này là nghiên cứu cải tiến mô hình và thử nghiệm áp dụng chúng cho các cơn bão trên biển Đông. Thừa hưởng những kết quả nghiên cứu trước đây là bài toán dự báo quỹ đạo bão đã được giải quyết tương đối tốt đối với loại bão mạnh và quỹ đạo ít biến đổi, nên ở đây chúng tôi chú trọng áp dụng ba loại mô hình được chọn trên chỉ cho những cơn bão thay đổi hướng mạnh và thay đổi đột ngột khi đi vào biển Đông, nhằm so sánh và khẳng định ưu và nhược điểm của từng loại mô hình.

Mô hình WBAR đã được cải tiến để có thể chạy với trường số liệu đầu vào từ mô hình toàn cầu của Nhật Bản (trước đây mô hình này chỉ chạy với số liệu đầu vào từ mô hình toàn cầu của Đức). Đây không chỉ đơn giản là thay số liệu đầu vào này bằng số liệu đầu vào khác, song song với nó là việc lựa chọn miền dự báo thích hợp, thay đổi cải tiến điều kiện biên và lựa chọn sơ đồ cài xoáy ban đầu để có được bộ tham số cho kết quả dự báo tốt nhất. Thử nghiệm với 15 cơn bão có dạng quỹ đạo thẳng, hoạt động trong khu vực biển Đông từ năm 1999 đến năm 2002 đã khẳng định

<sup>\*</sup> “Đào thải” số liệu (data rejection) là hiện tượng thú vị được biết đến từ tương đối lâu trong lịch sử phát triển của dự báo số trị. Việc hiệu chỉnh một cách “nhân tạo” một số biến của mô hình (ví dụ là để gần với số liệu thực đo hơn) tại một khu vực nhỏ trong miền tính toán sẽ tạo ra một bất cân bằng nhất định. Mô hình sẽ “phản ứng” lại bằng cách sinh ra các sóng quán tính trọng trường làm lan truyền và khuếch tán sự mất cân bằng đó. Kết quả là chỉ sau một vài giờ tích phân, dường như không còn dấu hiệu của các số liệu vừa được cho thêm vào. Từ *đào thải* được sử dụng giống như thuật ngữ y học vì hiện tượng cũng xảy ra tương tự như khi cơ thể đào thải một bộ phận mới được cấy ghép từ một cơ thể khác [13].

khả năng dự báo tương đối tốt các cơn bão có quỹ đạo ít thay đổi của loại mô hình này (sai số trung bình là 120km và 267km cho dự báo 24 giờ và 48 giờ).

Tuy nhiên, nhận định lý thuyết ở phần trên về độ tin cậy của các mô hình nước nông chính áp khi có ảnh hưởng của các hệ thống tà áp được xác nhận bởi các thử nghiệm với mô hình WBAR. Hai cơn bão có quỹ đạo chuyển hướng được lựa chọn thử nghiệm là Mekkhala (0220) và Nepartak (0320) với số liệu mực 500hPa và số liệu cho lớp khí quyển trung bình (Deep Layer Mean-DLM) đều dự báo bão đi theo hướng tây và tây tây nam trong khi bão chuyển hướng lên bắc tây bắc và bắc, gây nên sai số dự báo rất lớn.



Hình 1. Sơ đồ khả năng chuyển hướng của bão khi đi vào trường hình yên

đi của bão. Theo các tác giả này, đây cũng là hình thế gây nên sai số lớn của mô hình NOGAPS và GFDN<sup>10</sup> do mô hình khuếch đại (hoặc làm suy giảm) ảnh hưởng của các quá trình sinh xoáy trong hệ thống tà áp vĩ độ trung bình.

Với việc sử dụng điều kiện ban đầu và điều kiện biên từ mô hình toàn cầu như trong WBAR (hay bất cứ một mô hình lãnh thổ hạn chế nào khác), các hệ thống qui mô lớn nói trên đã được xác định bởi mô hình toàn cầu. Vì vậy, phương hướng cải tiến mô hình chính áp trong việc khắc phục các trường hợp có ảnh hưởng của các quá trình động lực tà áp có thể là:

- 1) lựa chọn mực dòng dẫn thích hợp để thể hiện được hệ thống tà áp (ví dụ như rãnh thấp gió tây nói trên) và
- 2) thay đổi cấu trúc ngang (vị trí, hình dạng và kích thước) của xoáy bão trong trường ban đầu của mô hình.

Thử nghiệm WBAR cho sự chuyển hướng của bão Mekkhala cũng đã cho thấy việc lựa chọn mực dòng dẫn ảnh hưởng lớn đến kết quả dự báo. Sử dụng mực 700hPa cho kết quả tốt hơn hẳn so với sử dụng mực 500hPa hoặc sử dụng số liệu cho lớp khí quyển trung bình. Mặt khác, bên cạnh việc thể hiện được hệ thống động lực tà áp của môi trường, khi lựa chọn mực dòng dẫn cũng phải lưu ý đến cấu trúc thẳng đứng của cơn bão. Trên thực tế, các cơn bão khác nhau có cấu trúc thẳng đứng của hoàn lưu bão không giống nhau. Các cơn bão mạnh thường phát triển lên đến độ cao lớn hơn so với các cơn bão yếu<sup>11</sup> và do đó, mực dòng dẫn của các cơn bão khác nhau cũng phải được lựa chọn khác nhau. Như vậy, việc lựa chọn mực hay lựa chọn bề dày khí

<sup>9</sup> Khu vực phía trước các rãnh gió tây là nơi thuận lợi cho các quá trình sinh xoáy thuận.

<sup>10</sup> GFDN là phiên bản của mô hình GFDL được sử dụng bởi Hải Quân Mỹ.

<sup>11</sup> Tuy nhiên, điều ngược lại không hoàn toàn đúng vì có những cơn bão có cấu trúc thẳng đứng phát triển cao nhưng hoàn lưu xoáy thuận ở bề mặt lại không mạnh. Một trong những nguyên nhân của trường hợp này là do hoàn lưu tầng thấp của bão bị suy yếu đáng kể (ví dụ bởi ảnh hưởng của ma sát bề mặt khi bão đi qua đảo) trong khi cấu trúc trên cao vẫn còn giữ được cường độ.



quyển để làm số liệu đầu vào cho các mô hình nước nông hai chiều là một vấn đề cần được nghiên cứu kỹ hơn để có thể phân nào nâng cao chất lượng dự báo của mô hình loại này, nhất là trong những điều kiện phức tạp có ảnh hưởng của độ tà áp mạnh.

Hướng cải tiến thứ hai được thử nghiệm và minh họa trong Hình 1. Với vị trí tương đối phức tạp của xoáy bão đối với hệ thống CACND, sai số vị trí và mô tả kích thước của xoáy bão ban đầu trong mô hình dẫn đến dự báo bão đi xuống phía dưới của CACND (đến điểm B) thay vì đi lên phía bắc (đến điểm A trong Hình 1) như đã xảy ra trong dự báo thử nghiệm. Nguyên nhân này cũng được phản ánh trong [8] khi thử nghiệm với mô hình chính áp BARO cho cơn bão Ted (9513). Với việc thay bán kính ảnh hưởng của xoáy bão ban đầu từ một giá trị cố định (2000km) thành giá trị bằng 3 lần bán kính gió mạnh 35 kts, BARO đã dự báo được sự chuyển hướng lên phía bắc thay vì dự báo bão đi theo tây và tây tây nam. Sự khác biệt trong các kết quả dự báo này là do ảnh hưởng tương tác phi tuyến của môi trường với hoàn lưu bão khác nhau với các kích thước khác nhau của xoáy bão.

Tuy WBAR còn bộc lộ những nhược điểm nhất định như nêu trên, nhưng WBAR sẽ có khả năng phục vụ hiệu quả hơn nếu tiếp tục được nghiên cứu theo hướng dự báo tổ hợp cùng với biến đổi về phương pháp cài xoáy cũng như xác định tốt các tham số xoáy ban đầu và các mực khí quyển đại diện cho mực trung bình.

**Mô hình DR97** đã được cải tiến và xây dựng thêm rất nhiều phần quan trọng nhằm biến phiên bản mô hình lý thuyết mô phỏng xoáy bão trong điều kiện lý tưởng thành phiên bản mô hình sử dụng số liệu thực hướng tới phục vụ dự báo nghiệp vụ. Quá trình áp dụng số liệu thực cho DR97 được thực hiện tuần tự theo các bước từ đơn giản đến phức tạp, phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của mô hình. Đầu tiên là áp dụng số liệu gió thực đại diện cho các lớp mô hình với sử dụng phương pháp ban đầu hoá xoáy như trong WBAR. Bước tiếp theo là thay đổi các tham biến đặc trưng cho bề dày thẳng đứng của khí quyển biểu diễn cấu trúc thẳng đứng 3 lớp của mô hình. Bước cuối cùng là thay đổi điều kiện biên bằng cập nhật điều kiện biên từ dự báo của mô hình toàn cầu thay cho điều kiện biên không thấm (trên hai biên bắc và nam) và tuần hoàn (trên hai biên đông và tây) của phiên bản nguyên thủy. Chi tiết về phiên bản dự báo của DR97 được trình bày trong [5].

DR97 được thử nghiệm áp dụng với số liệu đầu vào từ mô hình toàn cầu của Nhật để nghiên cứu khả năng dự báo sự chuyển hướng của bão với hai cơn bão Mekkhala và Nepartak là hai cơn bão đã được thử nghiệm với mô hình WBAR nêu trên. Kết quả cho thấy DR97 thể hiện được sự chuyển hướng của bão hơn hẳn mô hình chính áp WBAR nói trên (kết quả dự báo bão Mekkhala được trình bày trong [5]). Sai số trung bình cho hai cơn bão này (cho 6 thời điểm dự báo) lần lượt là 92km và 199 km cho các hạn dự báo 24 giờ và 48 giờ. Kết quả này là rất đáng khích lệ vì nó thậm chí còn tốt hơn cả dự báo của mô hình thời tiết phân giải cao HRM trong các trường hợp này (sẽ được nói đến ở phần sau).

Tất nhiên, từ trường hợp này không thể nói rằng mô hình DR97 tốt hơn HRM. Việc thay đổi các tham số bề dày các lớp khí quyển để phù hợp với số liệu gió được đưa vào làm đại diện cho 3 lớp mô hình là rất quan trọng vì nó đã nâng cao chất lượng dự báo quỹ đạo bão. Đây là một kết quả khá quan trọng việc cải tiến DR97 mà chúng tôi đã đạt được trong nghiên cứu này. Thêm vào đó, việc sử dụng số liệu ban đầu với xoáy bão được thể hiện tốt cũng là nguyên nhân góp phần tạo nên kết quả dự báo tốt ở đây.

Tuy nhiên, một khó khăn gặp phải khi sử dụng loại mô hình này với số liệu đầu vào và điều kiện biên từ mô hình toàn cầu là khó có thể xác định chính xác các lớp có mật độ đồng nhất theo giả thiết của mô hình. Có lẽ, đây cũng chính là một trong những hạn chế khi sử dụng loại mô hình này trong dự báo nghiệp vụ.

Như vậy, với cấu trúc tương đối đơn giản, cho phép tính toán trong thời gian không lớn, việc thử nghiệm mô hình nước nông ba lớp DR97 với số liệu đầu vào từ mô hình toàn cầu đã cho thấy khả năng dự báo của mô hình này tương đối tốt ngay cả với trường hợp quỹ đạo bão chuyển hướng phức tạp. Việc áp dụng mô hình này vào nghiệp vụ là khả thi, tuy vẫn cần phải có nhiều thử nghiệm rộng hơn để tìm hiểu kỹ những hạn chế của mô hình.

**Mô hình HRM** là mô hình phân giải cao đại diện cho lớp mô hình sử dụng hệ phương trình nguyên thủy. Hiện nay HRM đang được sử dụng trong dự báo thời tiết nghiệp vụ tại Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Trung ương và phục vụ cho công tác nghiên cứu, giảng dạy tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

Kiều Thị Xin và nnk [4] đã thử nghiệm mô hình HRM cho cơn bão DURIAN (0103) và đưa ra nhận định khả quan về khả năng sử dụng mô hình này không những cho dự báo thời tiết bình thường mà còn cho dự báo bão. Tuy nhiên, kết quả dự báo cũng được nhận xét là còn kém hơn so với các mô hình khác và điều này được giải thích bằng chất lượng không thực sự tốt (đối với cơn bão này) của số liệu từ mô hình toàn cầu của Đức. Gần đây hơn, Hoàng Đức Cường [1] đã thử nghiệm mô hình MM5 với số liệu đầu vào từ mô hình AVN của Hoa Kỳ với cơn bão KROVANH (0305). Kết quả cũng được nhận xét là phù hợp với diễn biến của bão (tuy không có đánh giá định lượng) và khi sử dụng thêm ban đầu hóa xoáy trong MM5, kết quả dự báo được cải thiện hơn.

Tuy các kết quả bước đầu là đáng khích lệ, thể hiện khả năng áp dụng các mô hình loại này, nhưng các thử nghiệm đều là với các trường hợp bão có đường đi tương đối thẳng, khi mà các mô hình đơn giản hơn cũng có thể dự báo tương đối tốt. Để kiểm tra tính ưu việt của mô hình HRM trong việc mô tả “đầy đủ” khí quyển, chúng tôi đã thử nghiệm HRM với hai cơn bão có quỹ đạo chuyển hướng nêu trên là Mekkhala (0220) và Nepartak (0320). Kết quả cho thấy tuy sai số dự báo còn lớn nhưng mô hình đã chỉ ra được sự chuyển hướng của các cơn bão này ngay cả trong trường hợp vị trí ban đầu của xoáy bão (lấy từ mô hình toàn cầu của Khí tượng Đức) nằm ở vị trí tương đối xa so với vị trí tâm bão quan trắc được.

Một thử nghiệm tiếp theo đã được tiến hành với phiên bản sử dụng số liệu đầu vào từ mô hình toàn cầu của Nhật (do mô hình này có vị trí tâm bão thường là rất gần với vị trí quan trắc được). Kết quả dự báo 24 giờ cho thấy có cải thiện đáng kể (sai số 24 giờ trung bình cho cơn bão Nepartak giảm từ 135km xuống còn 56km). Tuy nhiên, kết quả dự báo 48 giờ và 72 giờ lại không tốt. Nghiên cứu kết quả dự báo cho thấy sự không tương thích giữa bản chất của mô hình HRM và mô hình toàn cầu của Nhật, gây nên các nhiễu động sóng ngắn phát triển nhanh trong quá trình tích phân.

Các kết quả thử nghiệm bước đầu nêu trên đều làm nổi bật tầm quan trọng của chất lượng số liệu ban đầu cho mô hình. Điều này cũng phù hợp với nhận định của DeMaria [17] khi đánh giá về chất lượng dự báo của các mô hình trợ giúp dự báo bão tại trung tâm Dự báo Bão NHC tại Miami cho hai năm 1995-1996:

*“Một mô hình dự báo phức tạp không thể đưa ra được dự báo tốt với trường hợp ban đầu thiếu chính xác. Số liệu thừa thớt có thể giải thích tại sao nhiều mô hình đã*

*áp nói chung không vượt trội hơn các mô hình chính áp đơn giản ở khu vực Đông Thái Bình Dương. Những mô hình đơn giản này đã sử dụng hiệu quả các vectơ chuyển động ban đầu của bão. Trong những vùng không có số liệu, hướng và vận tốc di chuyển của bão trong quá khứ có thể dùng để hiệu chỉnh trường ban đầu, phần nào bù lại sự thiếu hụt số liệu”.*

Cuối cùng, chúng tôi đã thử nghiệm mô hình HRM với việc lựa chọn các miền dự báo khác nhau (giữ nguyên độ phân giải), chọn ra miền dự báo cho kết quả dự báo tốt nhất với các cơn bão có quỹ đạo phức tạp chuyển hướng nói trên, sau đó giữ nguyên miền dự báo và tăng độ phân giải của mô hình lên gấp đôi. Điều lý thú rút ra từ kết quả thử nghiệm này là khi tăng độ phân giải kết hợp với việc chọn miền dự báo thích hợp thì khả năng dự báo bằng HRM đối với loại bão chuyển hướng mạnh tăng lên rõ rệt, dù cho sai số trong trường ban đầu chưa được cải thiện (vẫn là trường ban đầu lấy từ mô hình toàn cầu của Đức). Đúng như phân tích của Carr & Elsberry [12], với độ phân giải cao hơn, HRM có khả năng mô tả tốt hơn cơ chế vật lý của các quá trình khí quyển quy mô nhỏ hơn tác động trực tiếp đến chuyển động của bão. Phiên bản HRM với miền dự báo mới và độ phân giải cao hơn nói trên sẽ được áp dụng thử nghiệm vào nghiệp vụ trong thời gian tới.

Như vậy, một trong những biện pháp cải thiện dự báo bão cho các mô hình phức tạp như HRM hay MM5 là việc nâng cao chất lượng trường số liệu ban đầu. Cách tiếp cận bằng việc sử dụng số liệu ban đầu từ một mô hình toàn cầu khác bản chất, nhưng có chất lượng tốt hơn tuy là khả thi nhưng đòi hỏi phải có đầu tư nghiên cứu sâu hơn nữa để xử lý các ảnh hưởng không mong muốn. Mặt khác, việc cải thiện trường ban đầu bằng cách cài xoáy bão vào mô hình cũng là một cách tiếp cận đúng đắn nhưng đòi hỏi kỹ thuật phức tạp do cấu trúc phức tạp của mô hình cũng như các số liệu thám sát bão còn nhiều hạn chế về mặt số lượng cũng như chất lượng.

Tóm lại, việc sử dụng các mô hình hệ phương trình nguyên thủy cho dự báo bão là một công việc phức tạp và tinh tế, đòi hỏi rất nhiều đầu tư nghiên cứu cải tiến, đặc biệt là nâng cao chất lượng số liệu đầu vào. Tuy nhiên, do khả năng dự báo của các mô hình loại này rất có triển vọng, việc phát triển cải tiến chúng ngày càng hoàn chỉnh và chính xác hơn là xu hướng chung trên thế giới.

### **Kết luận**

Việc phân tích các loại mô hình số ở trên cho thấy một bức tranh tương đối khái quát về các ưu điểm và hạn chế của chúng trong dự báo bão. Các mô hình thô sơ tuy có những hạn chế nhất định do các giả thiết đơn giản hóa, đổi lại, sự gọn nhẹ trong tính toán và dễ dàng tạo trường xoáy ban đầu gắn với quan trắc khiến cho chúng trở nên rất hữu ích trong điều kiện thiếu số liệu thám sát chi tiết như hiện nay. Trong những trường hợp này, các mô hình phức tạp có mô tả “đầy đủ” các quá trình vật lý trong khí quyển lại có thể tỏ ra không hiệu quả bằng, do việc tạo trường xoáy ban đầu chi tiết cụ thể hơn là hoàn toàn không đơn giản. Đây có lẽ cũng là một trong những lý do khiến cho Hoa Kỳ và các nước phát triển khác về dự báo bão vẫn sử dụng nghiệp vụ song song các mô hình đơn giản (LBAR, BAM) bên cạnh các mô hình bão phức tạp vào bậc nhất như GFDL.

Qua việc thử nghiệm với một số cơn bão có đường đi chuyển hướng phức tạp, một số mô hình bão sẵn có ở nước ta hiện nay (WBAR, DR97 và HRM) đã bộc lộ khả năng và những tồn tại của chúng. Mang nét đặc trưng của các mô hình chính áp, dự báo của mô hình WBAR tuy là tương đối tốt đối với các cơn bão mạnh và có quỹ đạo dạng thẳng, lại tỏ ra không đáng tin cậy trong các trường hợp bão đổi hướng.

Trong trường hợp này, mực trung bình được chọn làm dự báo, phương pháp cài xoáy bão và tính chất (kích thước và cường độ) của xoáy bão nhân tạo là các yếu tố ảnh hưởng tới kết quả dự báo của mô hình này. Do đó, việc nghiên cứu lựa chọn các tham số thích hợp sẽ là phương hướng cải tiến và nâng cao chất lượng dự báo của mô hình này. Trong khi đó, mô hình nước nông ba lớp DR97 tỏ ra có triển vọng khi áp dụng với số liệu thực từ mô hình toàn cầu của Nhật. Với cấu trúc thẳng đứng tối thiểu, mô hình này đã dự báo được sự chuyển hướng của bão khi có tác động của nguyên nhân tà áp (rãnh thấp trong miền gió tây trên cao) trong các trường hợp được thử nghiệm. Tuy nhiên, vẫn cần thiết phải có các nghiên cứu sâu hơn để khẳng định khả năng của mô hình này. Mặt khác, với sự phức tạp và tinh tế trong việc mô tả nhiều quá trình vật lý khí quyển, mô hình HRM tỏ ra là một công cụ rất hữu ích vì nó không chỉ dự báo quỹ đạo của bão, mà còn đưa ra được các yếu tố quan trọng khác đi kèm với bão như mưa lớn, gió mạnh. Tuy nhiên, một khó khăn lớn của việc áp dụng các mô hình đầy đủ như HRM, ngoài việc đòi hỏi khả năng tính toán nhanh còn cần phải cải thiện số liệu đầu vào, mà công việc này phức tạp hơn rất nhiều so với các mô hình đơn giản khác.

Hy vọng rằng, với việc sử dụng kết quả dự báo của các mô hình số dựa trên hiểu biết sâu về các đặc tính và khả năng dự báo của chúng, nghiên cứu cải tiến chúng đúng hướng (tập trung vào các khía cạnh ảnh hưởng nhiều đến kết quả dự báo), các mô hình số sẽ ngày càng trở thành một công cụ đắc lực và đáng tin cậy hơn trong việc dự báo bão phục vụ phòng chống và giảm nhẹ thiên tai.

### Tài liệu tham khảo

1. Hoàng Đức Cường. Thử nghiệm áp dụng mô hình MM5V3 để dự báo thời tiết ở Việt Nam trong cơn bão số 5/2003 (KROVANH).- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 1(505), tr 26-33, 2004.
2. Bùi Hoàng Hải, Phan Văn Tân. Khảo sát ảnh hưởng của trường ban đầu hoá đến sự chuyển động của bão trong mô hình chính áp dự báo quỹ đạo bão khu vực biển Đông.- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 8(500), tr. 17-23, 2002.
3. Kiều Thị Xin, Phan Văn Tân, Lê Công Thành, Đỗ Lệ Thủy, Nguyễn Văn Sáng. Mô hình dự báo số phân giải cao HRM và thử nghiệm áp dụng dự báo thời tiết khu vực Đông Nam Á - Việt Nam.- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 8(488), tr. 36, 2001.
4. Kiều Thị Xin, Lê Công Thành và Phan Văn Tân. Áp dụng mô hình số khu vực phân giải cao vào dự báo hoạt động của bão ở Việt Nam và biển Đông, 2002.
5. Lê Công Thành, Kiều Thị Xin. Thử nghiệm dự báo quỹ đạo bão trên biển Đông bằng mô hình nước nông ba lớp.- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 12 (516), tr. 1-7, 2003.
6. Đỗ Ngọc Thắng, Vũ Duy Tiến. Nghiên cứu chạy thử nghiệm mô hình dự báo thời tiết số trị ETA (phiên bản tháng III-2001.- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 9(513), tr 30-34, 2003.
7. Nguyễn Thị Minh Phương. Kết quả dự báo Quỹ đạo bão biển Đông bằng mô hình chính áp với sơ đồ ban đầu hoá xoáy trong hai năm 2001-2002. Báo cáo kỹ thuật. Phòng Nghiên cứu ứng dụng, Trung tâm Dự báo KTTV Trung ương; 2003.

8. Nguyễn Thị Minh Phương. Lựa chọn một tham số cho sơ đồ ban đầu hoá xoáy trong mô hình chính áp dự báo đường đi của bão trên biển Đông.- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 12(516), tr. 13-22, 2003.
9. Phan Văn Tân, Nguyễn Văn Sáng. Mô hình chính áp WBAR và khả năng ứng dụng dự báo bão khu vực Tây Bắc Thái Bình Dương và biển Đông.- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 6(498), 2002, tr. 27-33, 2002.
10. Phan Văn Tân, Kiều Thị Xin, Nguyễn Văn Sáng, Nguyễn Văn Hiệp. Kỹ thuật phân tích tạo xoáy ban đầu cho mô hình chính áp dự báo quỹ đạo bão.- *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 1(493), 2002, tr.13-22, 2002.
11. Charney, J. G..Dynamical Forecasting by numerical process. Compendium of meteorology. Americal Meteorological Society, Boston, MA, 1951.
12. Carr, L.E. , and R.L. Elsberry. Systematic and Integrated approach to tropical cyclone track forecasting: Part III: Traits knowledge base for JTWC track forecast models in the Western North Pacific. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 1999.
13. Daley, R.. Atmospheric data analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
14. Davidson N.E., and H.C.Weber. The BMRC high-resolution tropical cyclone prediction system: TC-LAPS.- *Mon.Wea.Rev.*, 128, 1245-1265, 2000.
15. Davidson, N. Numerical and Statistical Model Guidance and Improvements. WMO Workshop Topic Reports IWTC-V 2002, 2002.
16. DeMaria, M.,Pickle. A simlified system of Equations for simulation of TC modeling. *JAS*, 45, 10, 1542-1554, 1988. .
17. DeMaria, M. Summary of the NHC/TPC Tropical Cyclone Track and Intensity Guidance Models. <http://www.nhc.noaa.gov/aboutmodels.shtml>, 1997.
18. Dengler, C. and M. Reeder. The effects of convection and baroclinicity on the motion of tropical-cyclone-like vortices.- *Quart. J. Royal Met. Soc.*,123, pp. 699-725, 1997.
19. Kalnay, E.. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, 2003.
20. Kurihara, Y., R.E.Tuleya, and M.A.Bender, 1997. The GFDL Hurricane Prediction System and Its Performance in the 1995 Hurricane Season.- *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1306 -1322.
21. Ooyama, K. V.. Numerical simulation of the life cycle of TC modeling. *JAS*, 26, 1, pp. 3-40, 1969.
22. Weber, H. C.. Hurricane track prediction with a new barotropic model.- *Mon. Wea. Rev.*, 129, 1834-1858, 2001.
23. Zehnder, J.. A comparison of convergence- and surface-flux-based convective parameterizations with applications to tropical cyclogenesis.- *J. Atmos. Sci.*, 58, 283-301, 2001.
24. Белов, П. Н., Е. П. Борисенков, и Б. Д. Панин. Численные Методы Прогноза Погоды. Ленинград Гидрометео-Издат, 1993.