Tạp chí ĐỊA CHẤT, loạt A, số 361-362, 11-12/2016, tr. 139-152

LUẬN GIẢI VỀ MÔ HÌNH VẬN ĐỘNG CỦA MANTI VÀ TRƯỜNG ỨNG SUẤT THẠCH QUYỂN ĐÔNG NAM Á TRÊN CƠ SỞ CẤU TRÚC VẬN TỐC SÓNG P

CAO ĐÌNH TRIỀU[1], ĐẶNG THANH HẢI[2], CAO ĐÌNH TRỌNG[2]

[1]*Viện Địa vật lý ứng dụng, Liên hiệp các Hội KH&KT Việt Nam;*

[2]*Viện Vật lý Địa cầu, Viện HL KH&CN Việt Nam*

Tóm tắt: *Trong khuôn khổ bài bảo này các tác giả tiến hành khái quát hóa cấu trúc thạch quyển, manti và luận giải mô hình trường ứng suất kiến tạo Hiện đại Đông Nam Á. Kết quả nghiên cứu cho thấy: 1) Đới hút chìm bao quanh Đông Nam Á có đặc trưng cấu trúc vận tốc sóng P theo dạng "cột" trong manti trên, lớp chuyển tiếp và lớp phân chia 1. Động đất tại các đới ranh giới mảng này có tần suất xuất hiện cao hơn và cấp độ mạnh lớn hơn phần nội mảng. Thạch quyển trong phạm vi đới ranh giới có độ sâu tới đáy từ 70 km đến 110 km và có biểu hiện phân chia thành các khối cấu trúc: 1/ Myanmar (Indo-Burma 80-100 km); 2/ Nicobar (Biển Andaman 70-75 km); 3/ Sumatra (75-95 km); 4/ Java (80-95 km); 5/ Timor (95-110 km); 6/ Halmahera (95-105 km); 7/ Sulu (90-110 km); 8/ Sulawesi (70-90 km); 9/ Philippines (85-110 km); 10/ Manila (95-105 km); 11/ Đài Loan (80-90 km); 12/ Batan (80-90 km); 2) Đới đứt gãy nội mảng Hải Nam - Natuna có vai trò là ranh giới phân chia manti nội mảng Đông Nam Á thành 02 phần rõ rệt: Phần phía đông có biểu hiện phân lớp ngang rõ nét, trong khi tại phần phía tây có sự xáo trộn rõ rệt của mô hình vận tốc sóng P theo chiều thẳng đứng và ngang. Độ sâu tới đáy thạch quyển khá phức tạp và bao gồm các khối cấu trúc: 1/ Sino-Burma (90-100 km); 2/ Shan Thái (95-105 km); 3/ Pattani (85-95 km); 4/ Đông Dương (Indochina, 80-105 km); 5/ Malaysia (85-95 km); 6/ Natuna (100-105 km); 7/ Việt-Trung (85-100 km); 8/ Hoàng Sa (75-85 km); 9/ Trung tâm Biển Đông (65-80 km); 10/ Trường Sa (90-110 km); 11/ Bắc Kalimantan (95-100 km); 12/ Kalimantan (90-95 km); 13/ Barito (85-90 km); 14/ Banda (65-90 km); 15/ Sulu (biển Sulu và biển Sulawesi 60-90 km); 3) Các "dòng chảy manti" là nguyên nhân gây nên chuyển động ngang của thạch quyển Đông Nam Á. Trục chính trường ứng suất nén ép cực đại nằm ngang (σ_1) trong phạm vi nội mảng thạch quyển Đông Nam Á có phương á kinh tuyến, chuyển sang đông nam về phía trung tâm Biển Đông và Boneo - Kalimantan. Ranh giới mảng thạch quyển Âu-Á tại khu vực Đông Nam Á chủ yếu nằm trong trạng thái ép nén (đới hút chìm Đông và Tây Philippin, đới hút chìm Sumatra-Java-Timor) đến nén ép - trượt bằng (dọc đứt gãy Saigang).*

I. MỞ ĐẦU

Nghiên cứu cắt lớp sóng dọc (sóng P) địa chấn thạch quyển và manti Đông Nam Á được tiến hành tại Viện Vật lý Địa cầu Kiev từ năm 2002 đến năm 2012. Đây là nhiệm vụ hợp tác giữa Viện Vật lý Địa cầu thuộc Viện Hàn lâm Khoa học Ucraina và Viện Vật lý Địa cầu thuộc Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Đại diện cho nhóm nghiên cứu này về phía Việt Nam là PGS.TS. Cao Đình Triều và GS.TS. Geiko V.S. là đối tác từ Ucraina. Đã có nhiều kết quả khoa học theo định hướng nghiên cứu này được công bố [1-3, 5-11]. Trong khuôn khổ bài báo này các tác giả giới thiệu một cách tóm lược một số kết quả đạt được của giai đoạn hợp tác nghiên cứu Việt Nam - Ucraina về manti và thạch quyển Đông Nam Á.

Khái niệm phân lớp cấu trúc thạch quyển và manti Trái đất được sử dụng trong bài báo này như sau: 1) Vỏ Trái đất, trung bình 0-50 km; 2) Thạch quyển

0-100 km (gồm vỏ Trái đất 0-50 km và đỉnh của manti 50-100 km; 3) Quyển dẻo 100-250 km; 4) Phần dưới của manti trên: 250-400 km; 5/ Đới chuyển tiếp 400-650 km; 6) Lớp phân chia 1 là 650-850 km; 7) Manti trung 850-1.700 km; 8) Lớp phân chia 2 là 1.700-2.200 km; 9) Manti dưới 2.200-2.900 km; 10) Đỉnh của manti 50-250 km; 11) Quyển kiến tạo 50-650 km (gồm quyển kiến tạo trên 50-400 km và quyển kiến tạo dưới 400-650 km.

Tọa độ nghiên cứu từ 15-25° vĩ Bắc và 90-135° kinh Đông.

II. ĐẶC ĐIỂM VẬN TỐC SÓNG P THẠCH QUYỂN VÀ MANTI ĐÔNG NAM Á

Đặc điểm vận tốc sóng P thạch quyển và manti Đông Nam Á được tính toán trên cơ sở các băng địa chấn ghi nhận được thời gian đến sóng P của tất cả các trận động đất mạnh trên thế giới từ năm 1966 đến 2006 (số liệu của ISC) của các trạm động đất khu vực châu Á - Thái Bình Dương [2, 3]. Phương pháp cắt lớp sóng địa chấn được Geyko V.S. (1998, 2004) [12, 13] xây dựng trên cơ sở giải bài toán ngược địa chấn bằng xấp xỉ phương trình Eikonal (Taylor's approximation of wave and eikonal equation in inverse seismic problems). Quy trình thiết lập mô hình vận tốc được tiến hành như sau: theo diện, từ độ sâu 50 km đến 850 km, cách nhau 25 km (tổng cộng có 33 mức xác định vận tốc sóng P (Hình 1 là ví dụ về mô hình sóng P ở độ sâu 200 km). Theo tuyến, khoảng cách giữa các tuyến là 1°, độ sâu nghiên cứu tới 2.600 km (tổng cộng có 41 mặt cắt dọc theo vĩ độ, 46 mặt cắt dọc theo kinh độ và 04 mặt cắt theo phương cắt chéo). Kết quả nghiên cứu cho thấy [9, 11, 20-25]:

Vận tốc sóng P trung bình của thạch quyển và phần trên manti có biểu hiện như sau: phần dưới vỏ Trái đất, ở độ sâu 50 km là 7,40-8,10 km/s; đỉnh manti, ở độ sâu 100 km là 7,80-8,10 km/s; ở độ sâu 200 km là 8,10-8,40 km/s; 300 km là 8,40-8,70 km/s; 500 km là 9,40-9,70 km/s và 700 km là 10,60-10,90 km/s.

Tại khu vực vỏ đại dương: Vận tốc sóng P cao trong quyển kiến tạo trên như sau: ở độ sâu 50 km là 7,80-8,10 km/s; 100 km là 8,00-8,10 km/s; 200 km là 8,00-8,10 km/s. Ngược lại, P có giá trị thấp trong quyển kiến tạo dưới như sau: ở độ sâu 300 km là 8,40-8,60 km/s; 400 km là 8,40-8,60 km/s; 500 km là 9,40-9,60 km/s).

Đới ranh giới mảng được phản ánh trên tài liệu vận tốc sóng P là đới có giá trị vận tốc thấp và biến đổi phức tạp theo phương ngang và thẳng đứng.

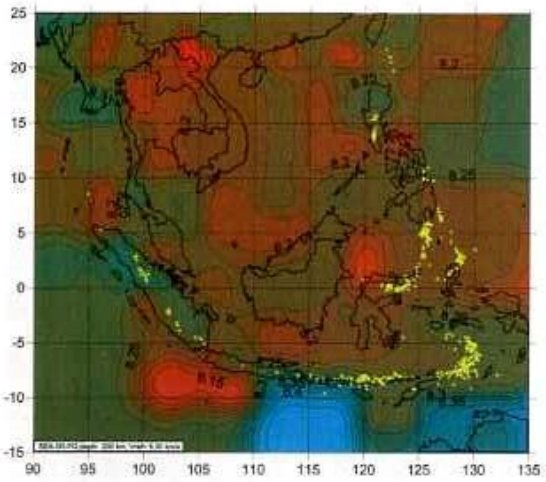
Vận tốc sóng P phần trên cùng của manti dưới, ở độ sâu 700 km, biến động trong giới hạn 10,60-10,90 km/s, có cấu trúc phức tạp, hình dạng cân xứng là chủ yếu và có sự đan xen giữa các cấu trúc âm và cấu trúc dương.

Giá trị vận tốc sóng P biến đổi rất phức tạp trong quyển kiến tạo, tăng dần đều theo độ sâu trong lớp phân chia 1 và manti trung, chuyển sang biến đổi mạnh trong lớp phân chia 2 và manti dưới.

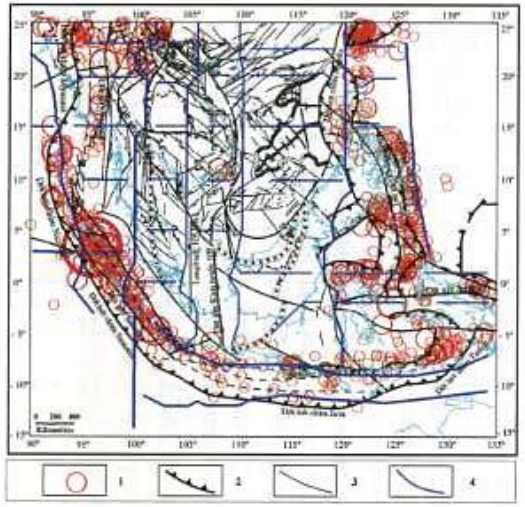
III. HÌNH THÁI CẤU TRÚC VÀ ĐẶC TRƯNG VẬN ĐỘNG CỦA MANTI ĐÔNG NAM Á

1. Đới ranh giới ngang vận tốc sóng P và biểu hiện hoạt động động đất

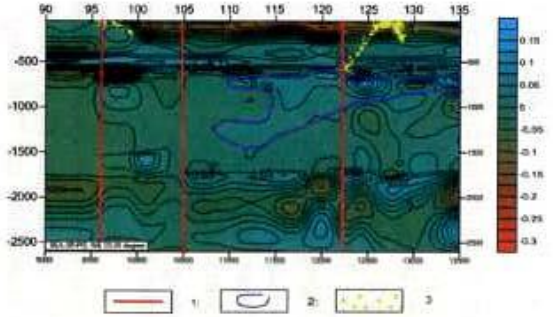
Nét nổi bật chung nhất của mô hình cắt lớp sóng P Đông Nam Á có sự phân dị theo phương nằm ngang (Hình 1). Có những ranh giới ngang tồn tại xuyên suốt manti từ độ sâu 50 km đến tận 2.600 km. Một số ranh giới chỉ tồn tại hoặc trong manti trên, hoặc trong lớp ranh giới 1, 2, hoặc trong manti trung và manti dưới. Ranh giới bất đồng nhất ngang vận tốc sóng P được nhận dạng trên cơ sở sự khác biệt về vận tốc truyền sóng P theo diện và theo mặt cắt [5, 9-11, 12, 19-25]. Ở đây các tác giả bài báo phân biệt hai loại ranh giới: có biểu hiện rõ nét sự khác biệt vận tốc sóng P xuyên suốt từ manti trên đến hết manti dưới và biểu hiện kém rõ nét hoặc ngắt quãng theo chiều sâu về vận tốc sóng P từ manti trên đến hết manti dưới. Kết quả phân định đới ranh giới ngang cho thấy (Hình 2):



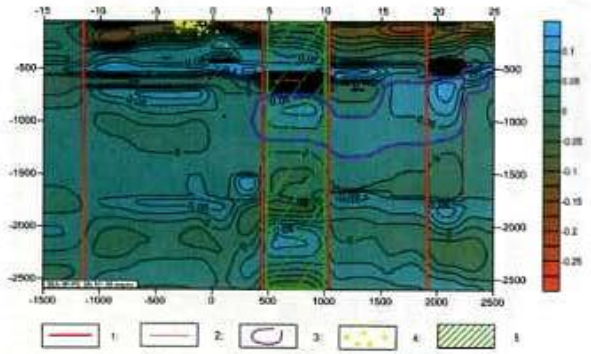
Hình 1. *Đặc điểm vận tốc truyền sóng P Đông Nam Á tại độ sâu 200 km [9, 20]. (Điểm dấu chấm là chấn tâm động đất)*



Hình 2. *Mối quan hệ giữa ranh giới ngang vận tốc sóng P và hoạt động động đất Đông Nam Á [6, 24]: 1- Chấn tâm động đất; 2- Đới hút chìm; 3- Đứt gãy trong thạch quyển; 4- Ranh giới ngang vận tốc truyền sóng P (nét đậm là ranh giới rõ nét, nét nhạt là ranh giới ít rõ nét).*



Hình 3. *Bất đồng nhất vận tốc truyền sóng P dọc theo vĩ tuyến 03° vỹ Bắc (điểm dấu chấm là chấn tâm động đất) [9, 20].*



Hình 4. *Bất đồng nhất vận tốc truyền sóng P dọc theo kinh tuyến 101° kinh Đông (điểm dấu chấm là chấn tâm động đất) [9, 20].*

Chú giải chung cho Hình 3 và Hình 4: *1- Ranh giới bất đồng nhất vận tốc truyền sóng P xuyên suốt trong manti (số 1 trong các Hình 3 và 4); 2- Ranh giới bất đồng nhất vận tốc truyền sóng P không xuyên suốt trong manti (số 2 trong Hình 4); 3- Lớp nghiêng trong manti (số 2 trong Hình 3 và số 3 trong Hình 4); 4- Chấn tiêu động đất (số 3 Hình 3, số 4 Hình 4); 5- Cột manti (số 5 trong Hình 4).*

Các ranh giới vận tốc sóng P xuyên suốt manti đóng vai trò là ranh giới mảng thạch quyển. Phần nội mảng Đông Nam Á có biểu hiện biến đổi phức tạp của vận tốc sóng P cả theo chiều ngang lẫn chiều thẳng đứng. Trong khi đó, tính phân lớp ngang biểu hiện rõ nét tại các mảng Ấn-Úc và Thái Bình Dương.

Đới hút chìm bao quanh Đông Nam Á có đặc trưng cấu trúc vận tốc sóng P theo dạng "cột" trong manti trên, lớp chuyển tiếp và lớp phân chia 1. Đới này trùng với các đới phát sinh động đất thuộc ranh giới mảng, có độ sâu chấn tiêu từ rất nông đến rất sâu. Chấn tiêu động đất sâu nhất thuộc các đới ranh giới mảng Sumatra (650 km), Java (700 km), Timor (700 km), Phillippine (700 km); thứ đến là các đới thuộc ranh giới mảng còn lại như Indo-Burma (300 km), Andaman (500 km), Hammahera (350 km), Manila (400 km), Taiwan (350 km). Động đất tại các đới ranh giới mảng này có tần suất xuất hiện cao, cấp độ mạnh có thể đạt 9,0 (động đất Sumatra năm 2004) [3, 6, 8].

Các đới đứt gãy nội mảng như: Kinh tuyến 110° (Hải Nam - Natuna), Kinh tuyến 105°, Sông Hồng, Bắc Hoàng Sa cũng là những đứt gãy có độ sâu lớn trong thạch quyển và có biểu hiện rõ nét là ranh giới vận tốc sóng P trong quyển kiến tạo, lớp phân chia 1 và lớp phân chia 2. Đặc biệt là đới đứt gãy Hải Nam - Natuna, có vai trò ranh giới phân chia manti nội mảng Đông Nam Á thành hai phần rõ rệt: phần phía đông có biểu hiện phân lớp ngang khá rõ nét, trong khi tại phần phía tây có sự biến đổi mạnh vận tốc sóng P theo chiều thẳng đứng và ngang. Biểu hiện hoạt động động đất phần nội mảng Đông Nam Á có tần suất xuất hiện thấp, cấp độ mạnh (Mmax <7,5) và độ sâu chấn tiêu nhỏ (h < 60 km) [7, 8, 11].

2. Vận tốc sóng P và biểu hiện "thể lỏng" hay "cấu trúc dạng cột" trong manti Đông Nam Á

Từ mô hình phát triển và hoạt động của các plum [15-18], có thể đưa ra giả thiết về sự tồn tại và hoạt động các "thể lỏng" (fluid system) hay cấu trúc dạng cột hoặc còn gọi là thể lưu biến [5]. Từ ranh giới nhân lỏng và manti xuất hiện các dòng vật chất dạng plasma (hỗn hợp nóng chảy manti và khí) chiếm một vùng diện tích rộng lớn chứa năng lượng. Sự xuất hiện các thể lỏng này đã tạo nên cấu trúc bất đồng nhất về mật độ (vận tốc sóng địa chấn) dạng dải giới hạn đường di chuyển của "thể lỏng" lên phần trên thạch quyển. Biểu hiện trên mô hình sóng địa chấn là cấu trúc dạng cột đan xen giữa vận tốc cao và vận tốc thấp (Hình 3, 4). Điều đáng chú ý nhất về mô hình cắt lớp sóng địa chấn manti Đông Nam châu Á là sự xuất hiện các "cấu trúc dạng cột", hay gọi ngắn gọn là "cột" trong manti. Đặc biệt là các cột manti xuất hiện tại các lớp ranh giới chuyển tiếp [5, 9-11, 21-25].

3. "Dòng chảy manti" Đông Nam Á và biểu hiện vận động của thạch quyển

a) Dòng chảy manti

Được phân định trên cơ sở nhận dạng các lớp nghiêng vận tốc sóng P xuất hiện trong lớp chuyển tiếp, nghiêng xuống lớp ranh giới 1 (Hình 3 và 4). Đây là lớp có vận tốc sóng P cao [9, 20-22]. Hình 6 biểu diễn hướng phát triển của "dòng chảy manti" và vận tốc dịch chuyển của thạch quyển Đông Nam Á.

b) Về vận tốc dịch chuyển của thạch quyển Đông Nam Á

Các tác giả sử dụng kết quả quan trắc GPS, dựa trên tích hợp số liệu từ 42 trạm đo bao gồm cả số liệu đo đạc trắc địa của nhóm các nhà khoa học Australia (AUSLIG) và kết quả trắc đạc GPS tại Việt Nam từ năm 1996 đến nay [5]. Theo các tài liệu thu thập được cho thấy phần nội mảng của Đông Nam Á là nơi có tốc độ dịch chuyển yếu, ổn định với giá trị nhỏ hơn 40 mm/năm. Tốc độ hội tụ của mảng Ấn-Úc và khối nội mảng Đông Nam Á theo kết quả phân tích đối sánh giữa NUVEL-1A và các phương dịch trượt của mặt đứt gãy trong động đất cho giá trị 66-72 mm/năm. Tại các vị trí khác nhau dọc theo đứt gãy Sumatra cũng quan

trắc thấy tốc độ dịch chuyển tương ứng khoảng 20-30 mm/năm (tại vị trí Cung Banda). Xuất hiện sự hội tụ tại vị trí giao cắt giữa ba giữa mảng thạch quyển châu Úc với phức hệ các khối liên kết của mảng Thái Bình Dương và mảng biển Philippin. Tiến về phía đông của khu vực Đông Nam Á, quá trình hội tụ giữa mảng biển Philippin và các phần nội mảng tạo nên một đai phức hệ động. Trong khi đó ở phía Tây của khu vực Đông Nam Á, sự chuyển động tương đối gần như chính Bắc của mảng Ấn Độ so với Âu-Á với vận tốc là 45-52 mm/năm. Kéo theo quá trình chuyển động về phía bắc của mảng Ấn Độ là một loạt các hoạt động khác của khu vực kề cận như quá trình mở rộng của biển Andaman, dịch chuyển trượt bằng dọc theo đứt gãy Saigang, quá trình nén ép nghiêng và tiêu biến dọc theo các đới hút chìm Andaman và Indo-Burma.

c) Đối sánh giữa phương dịch chuyển của "dòng chảy manti" và dịch chuyển của thạch quyển Đông Nam Á (Hình 6) có thể luận giải như sau

Sự xuất hiện các "dòng chảy manti" từ lục địa Trung Hoa xuống, từ mảng Ấn-Úc và biển Philippin vào tạo nên sự xáo động mạnh mẽ của manti nội mảng Đông Nam Á. Biểu hiện trên mô hình vận tốc sóng P là sự thay đổi vận tốc phức tạp theo chiều ngang và thẳng đứng.

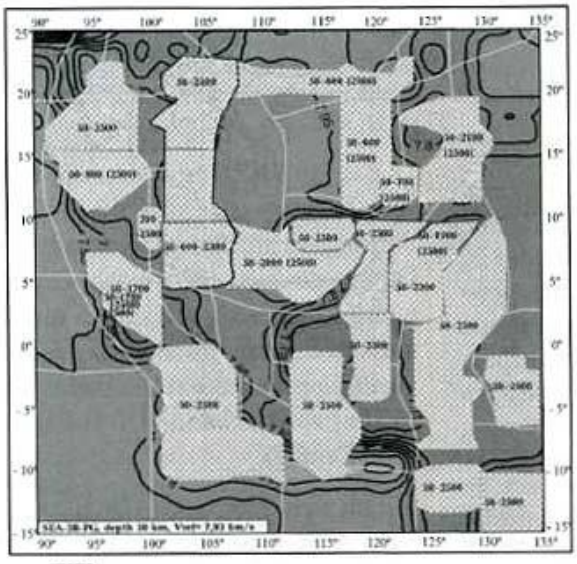
Dưới tác động của "dòng chảy manti" phương á vĩ tuyến từ tây sang đông: từ vịnh Bengan vào Đông Dương và từ Ấn Độ Dương vào Sumatra gây nên dịch chuyển phương đông bắc của khối Indoburma và Sumatra.

Khối ranh giới mảng Java và Timor có biểu hiện chuyển dịch về phía đông bắc, nhiều khả năng đó là hậu quả của "dòng chảy manti" về phía bắc và từ mảng Ấn-Úc.

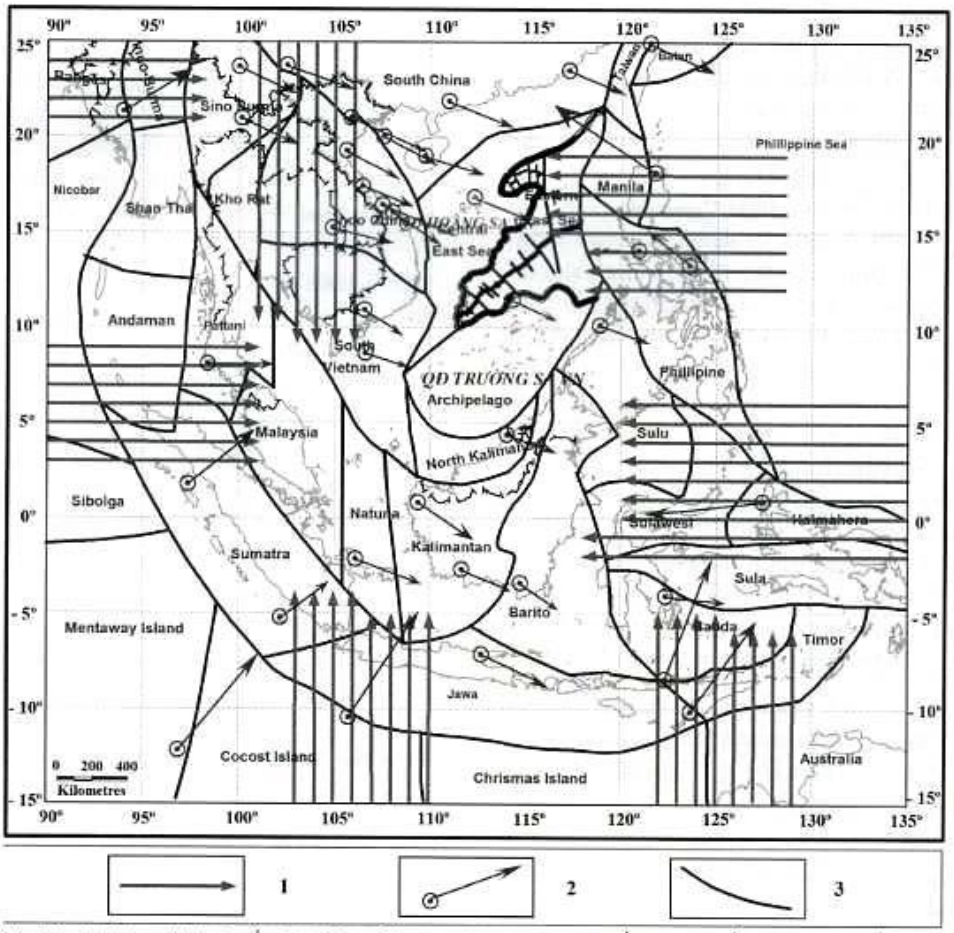
Sự xuất hiện các dòng chảy manti từ mảng biển Philippin (mảng Thái Bình Dương) vào nội mảng Đông Nam Á có thể đã gây nên chuyển dịch phương á vĩ tuyến của khối Hamahera, Philippines và Manila.

Có lẽ dòng chảy manti tạo nên sự vận động tương ứng cùng phương của thạch quyển Đông Nam Á. Theo kết quả quan trắc GPS cho thấy, khối Đông Dương đang dịch chuyển về phía đông nam với vận tốc nhỏ hơn 40 mm/năm. Đây là hậu quả của tác động "dòng chảy manti" từ lục địa Trung Hoa xuống phía nam.

Các nhận định trên đây chỉ là bước đầu, cần có kiểm chứng và nghiên cứu làm sáng tỏ hơn.



Hình 5. *Cấu trúc vận tốc kiểu dạng cột manti Đông Nam Á (1); 50-2500 (chữ số đầu là độ sâu tới đỉnh của cột và chữ số thứ hai là độ sâu tới đáy của cột.*



Chú giải: *1- Hướng dịch chuyển của "dòng chảy manti"; 2- Véc tơ vận tốc dịch chuyển của thạch quyển theo tài liệu GPS; 3- Ranh giới phân chia khối thạch quyển (nét đậm là ranh giới rõ nét, nét nhạt là ranh giới ít rõ nét).*

Hình 6. *Mối quan hệ giữa phương dịch chuyển của "dòng chảy manti" Đông Nam Á và véc tơ vận tốc dịch chuyển của thạch quyển theo tài liệu GPS;*

4. Mô hình cấu trúc thạch quyển Đông Nam Á

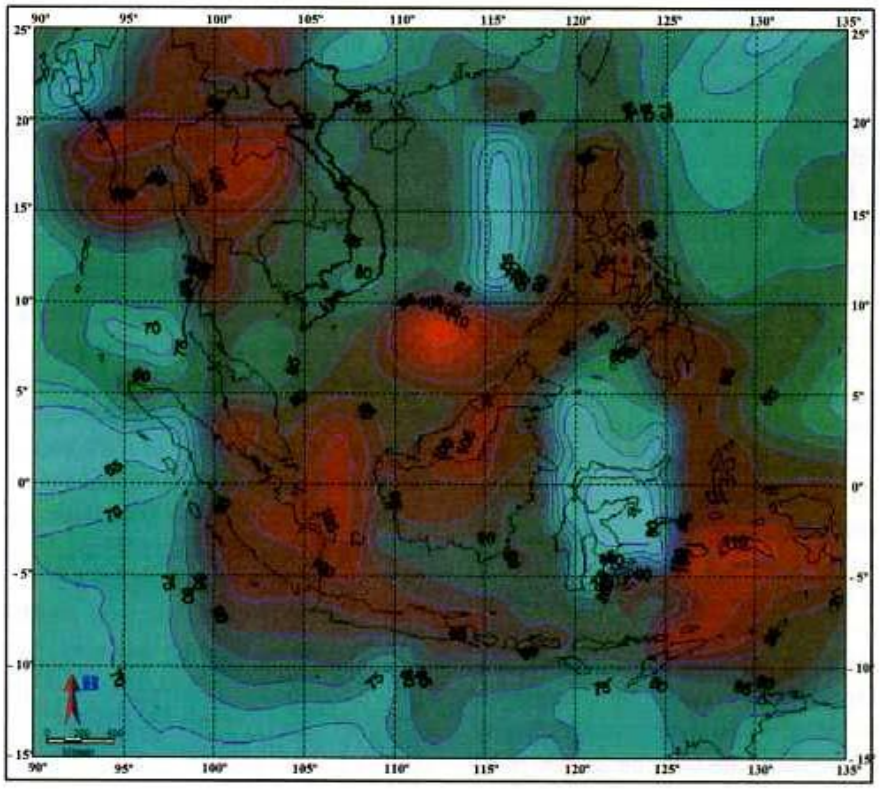
Mô hình cấu trúc thạch quyển Đông Nam Á được thiết lập dựa trên cơ sở mặt cắt dị thường vận tốc sóng P và trọng lực [5, 10, 11]. Đây là ranh giới phản ánh sự thay đổi vận tốc truyền sóng của phần phía dưới thạch quyển (lớp đỉnh của manti, có vận tốc lớn hơn) và phần phía trên của quyển dẻo (có vận tốc truyền sóng nhỏ hơn). Lớp này trùng với đường đẳng -0,05 km/s của dị thường sóng P.

Nét nổi bật của thạch quyển Đông Nam Á (Hình 7) có độ sâu tới đáy thạch quyển không lớn, nhỏ hơn 115 km, tính phân dị cấu trúc phức tạp và có biểu hiện phân khối cấu trúc như sau:

Bao quanh Đông Nam Á là mảng biển Ấn Độ, mảng Australia, mảng biển Philippines và một phần mảng Thái Bình Dương có biểu hiện thạch quyển bị vát mỏng (độ sâu tới đáy thạch quyển chỉ ở mức 65-95 km đối với mảng biển Ấn Độ và Philippines, 80-100 km đối với mảng Australia, 60-80 km đối với mảng Thái Bình Dương).

Đới ranh giới mảng thạch quyển Đông Nam Á có biểu hiện vát mỏng tương đối của thạch quyển (độ sâu tới đáy thạch

quyển biến đổi khoảng 70-110 km). Đới ranh giới này biểu hiện rõ nét trên tài liệu trọng lực vệ tinh, từ vệ tinh, đặc trưng hoạt động động đất và hoạt động núi lửa. Biểu hiện rõ nét phân định đới này là các khối cấu trúc thuộc ranh giới mảng gồm (các giá trị trong dấu ngoặc là độ sâu tới đáy của thạch quyển): 1) Myanmar (Indo-Burma 80-100 km); 2) Nicobar (biển Andaman 70-75 km); 3) Sumatra (75-95 km); 4) Java (80-95 km); 5) Timor (95-110 km); 6) Halmahera (95-105 km); 7) Sula (90-110 km); 8) Sulawesi (70-90 km); 9) Philippines (85-110 km); 10) Manila (95-105 km); 11) Đài Loan (80-90 km); 12) Batan (80-90 km).



Hình 7. *Độ sâu tới đáy của thạch quyển Đông Nam Á theo tài liệu cắt lớp sóng địa chấn và trọng lực vệ tinh [5, 10, 11].*

Trong phạm vi nội mảng Đông Nam Á, ngoài trung tâm Biển Đông có giá trị độ sâu tới đáy thạch quyển không lớn (65-80 km), ở các khu vực còn lại giá trị độ sâu này biến đổi trong giới hạn 85-110 km. Các khối cấu trúc nội mảng gồm: 1) Sino-Burma (90-100 km); 2) Shan Thái (95-105 km); 3) Pattani (85-95 km); 4) Đông Dương (Indochina 80-105 km); 5) Malaysia (85-95 km); 6) Natuna (100-105 km); 7) Việt-Trung (85-100 km); 8) Hoàng Sa (75-85 km); 9) Trung tâm Biển Đông (65-80 km); 10) Trường Sa (90-110 km); 11) Bắc Kalimantan (95-100 km); 12) Kalimantan (90-95 km); 13) Barito (85-90 km); 14) Banda (65-90 km); 15) Sulu (biển Sulu và biển Sulawesi, 60-90 km).

III. TRƯỜNG ỨNG SUẤT KIẾN TẠO THẠCH QUYỂN ĐÔNG NAM Á

1. Cơ sở phương pháp luận xác lập mô hình trường ứng suất

Mô hình mô phỏng trường ứng suất kiến tạo Hiện đại thạch quyển Đông Nam

Á (Hình 10) được xây dựng trên cơ sở phân tích kết hợp ba cách tiếp cận sau: Phân tích cấu trúc thạch quyển (vỏ Trái đất và phần trên cùng của đỉnh manti) và phân tích kết quả nghiên cứu cơ cấu chấn tiêu động đất [1, 2, 4, 5, 6-8, 10, 11].

a) Xác định trường ứng suất của thạch quyển trên cơ sở phân tích hình thái cấu trúc

Cơ sở tài liệu chính là sơ đồ phân bố chiều dày của thạch quyển; sơ đồ phân bố chiều dày vỏ Trái đất và sơ đồ phân bố bề dày phần trên cùng của đỉnh manti. Phương pháp luận trong nghiên cứu trạng thái ứng suất của thạch quyển được tóm lược như sau [4, 6, 11]:

Đối với thạch quyển: Bề dày thạch quyển bằng tổng bề dày của hai lớp chính (vỏ Trái đất và phần trên cùng của đỉnh manti) có độ lưu biến khác nhau. Phần trên cùng của đỉnh manti có tính lưu biến lớn hơn nên nhạy cảm hơn về thay đổi bề dày so với sự thay đổi bề dày của vỏ Trái đất. Dưới tác động của ứng suất nén ép, bề dày của vỏ và bề dày của lớp trên cùng của manti sẽ tăng lên, gây nên sự tăng đột biến của bề dày thạch quyển và quá trình ngược lại sẽ xảy ra (quá trình làm mỏng đi) khi thạch quyển nằm trong trạng thái căng giãn. Như vậy, trạng thái nén ép sẽ xảy ra tại nơi tồn tại đồng thời sự tăng bề dày của vỏ và phần trên cùng của đỉnh manti, và ngược lại, nơi xuất hiện đồng thời sự suy giảm bề dày của Vỏ và của lớp trên cùng đỉnh manti sẽ phản ánh trạng thái căng giãn. Trạng thái nén ép và căng giãn cũng được phản ánh rõ nét trên giá trị vận tốc sóng P: P tăng trong điều kiện nén ép và P giảm trong điều kiện căng giãn.

Các cấu trúc nhiệt độ cao trong quyển dẻo nằm sát đáy thạch quyển cũng gây nên sự tan biến của thạch quyển và làm giảm bề dày của thạch quyển (nhiệt độ tại ranh giới phía dưới của thạch quyển là khoảng 1.400°C). Sự tan biến này sẽ xảy ra từ từ và bắt đầu từ lớp trên cùng của đỉnh manti. Như vậy, quá trình tiêu biến của thạch quyển do tác động của nhiệt độ sẽ bắt đầu từ dưới lên trên và nơi có bề dày của lớp trên cùng đỉnh manti rất mỏng (hoặc không tồn tại) trong khi vỏ Trái đất vẫn ít thay đổi là nơi xảy ra quá trình nóng chảy dưới tác động của nhiệt độ.

Kết quả phân tích trạng thái ứng suất của thạch quyển lãnh thổ Việt Nam và kế cận được trình bày trong Hình 9 và cho thấy thạch quyển lãnh thổ Việt Nam và kế cận chủ yếu nằm trong trạng thái nén ép. Phương tác động của lực nén ép chủ yếu từ đông sang tây (từ mảng biển Philippin vào); T-TN lên B-ĐB (từ mảng Ấn Độ); B-TB xuống Đ-ĐN (từ vi mảng- khối Nam Trung Hoa).

Dưới tác động của trường ứng suất khu vực gây nên sự thay đổi phương tác động của lực nén ép trong phạm vi lãnh thổ Việt Nam và kế cận: Khối Đông Dương (Indochina) chịu tác động của lực nén ép có phương từ B-ĐB xuống N-TN từ khối Nam Trung Hoa - Đông Bắc Việt Nam; Khối trung tâm Biển Đông chịu lực nén ép của khối Đông Biển Đông theo phương từ đông sang tây; Khối trung tâm Biển Đông chịu lực nén ép từ khối Nam Trung Hoa - Đông Bắc Việt Nam theo phương từ B-TB xuống N-ĐN; Khối Nam Việt Nam chịu tác động của lực nén ép từ khối Indochina theo phương từ B-TB xuống N-ĐN.

Khối Trường Sa Việt Nam và khối Kho Rat đang chịu tác động của lực nén ép mạnh; trong khi khối Đông Biển Đông, phần lớn diện tích của khối Đông Dương và khối Nam Trung Hoa - Đông Bắc Việt Nam đang chịu tác động của lực căng giãn là chủ yếu.

Đối với vỏ Trái đất: Ứng suất vỏ Trái đất được hình thành chủ yếu do tác động của biến dạng dư trong các lớp, phụ thuộc vào trạng thái ứng suất đó, vỏ Trái đất ở những khu vực khác nhau chịu tác động của các dạng chuyển dịch khác nhau như theo phương thẳng đứng, nằm ngang,...

[1, 3, 4, 10]. Sự biến động lớn độ cao địa hình và thay đổi đáng kể bề dày vỏ Trái đất trong phạm vi lãnh thổ Việt Nam và kế cận cũng phản ánh đặc trưng dịch chuyển đó. Để tìm hiểu phương chuyển dịch ngang và trạng thái ứng suất vỏ Trái đất, trước hết chúng ta phải có được đặc trưng biểu hiện biến đổi bề dày vỏ Trái đất trước và sau khi xảy ra quá trình biến dạng. Vectơ dịch chuyển ngang vỏ Trái đất sẽ là đường phương phản ánh sự thay đổi bề dày Vỏ trước và sau quá trình đó. Trên thực tế, bề dày vỏ được thiết lập chỉ phản ánh thực tại Vỏ khu vực nghiên cứu. Việc tái tạo bề dày vỏ Trái đất trước khi chịu ảnh hưởng của biến dạng được tiến hành trên cơ sở [4, 11]:

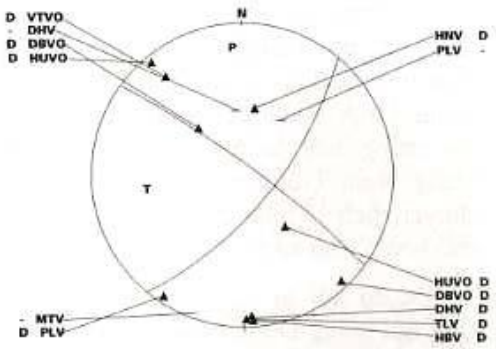
Thứ nhất: Quá trình biến dạng vỏ Trái đất xảy ra không đồng đều theo không gian và chứa đựng tính chất địa phương và khu vực. Giá trị bề dày vỏ Trái đất của khối cấp 1 (cấp lớn hơn) là tập hợp giá trị trung bình của các khối cấp 2 (cấp nhỏ hơn). Độ chênh lệch bề dày vỏ Trái đất khối có cấp nhỏ hơn (cấp 2) so với khối có cấp lớn hơn (cấp 1) là biểu hiện đặc trưng biến dạng vỏ Trái đất trong phạm vi khối đó so với khối lớn hơn.

Thứ hai. Bề dày vỏ Trái đất ở vùng nền, địa khối ít bị biến dạng trong quá trình hoạt động biến dạng Tân kiến tạo. Như vậy có thể sử dụng giá trị bề dày vỏ Trái đất ở các khu vực đó như là giá trị chuẩn trong thiết lập, tái tạo lại mô hình vỏ Trái đất trước khi xảy ra quá trình biến dạng.

Trên cơ sở lý luận này, các tác giả đã xác lập được [4, 11]: Vận tốc dịch chuyển thẳng đứng trung bình vỏ Trái đất lãnh thổ Việt Nam trong Tân kiến tạo đạt giá trị lớn hơn -1,0 mm/năm đến nhỏ hơn 0,9 mm/năm; Vectơ vận tốc dịch chuyển ngang vỏ Trái đất lãnh thổ Việt Nam có biểu hiện phức tạp song khá ổn định trong các khối cấp 2 của thạch quyển. Vận tốc trung bình dịch chuyển ngang tối đa có thể đạt trên 3 mm/năm, trong đó đáng kể nhất là trung tâm Biển Đông, trũng Sông Hồng và trũng Malay; Trạng thái ứng suất vỏ Trái đất lãnh thổ Việt Nam được mô tả trong Hình 9.

b) Xác định trường ứng suất của thạch quyển trên cơ sở kết quả nghiên cứu cơ cấu chấn tiêu động đất

Cơ cấu chấn tiêu của các trận động đất lãnh thổ Việt Nam cũng như ở khu vực Đông Nam Á chủ yếu được xác định bằng phương pháp dấu dịch chuyển sóng P dựa vào số liệu địa chấn của mạng lưới trạm động đất Việt Nam và thế giới [11]. Chương trình FORMEC được sử dụng để đưa ra các nghiệm hợp lý và biểu diễn cơ cấu chấn tiêu của mỗi trận động đất. Kết quả được biểu diễn trên lưới chiếu và bảng mô tả các thông số của cơ cấu chấn tiêu như ví dụ sau:



		Phương	góc cắm
hướng trượt			
Mặt đứt đoạn chính	:	306	82
156			
Mặt phụ trợ	:	40	67
9.0			
Trục ứng suất nén P	:	góc nghiêng 10,	
Phương vị 335			
Trục ứng suất giãn	:	góc nghiêng 23,	
Phương vị 261			

Cơ cấu chấn tiêu: trượt bằng phải có hợp phần thuận nhỏ, mặt trượt gần dốc đứng (82°) cắm về phía đông bắc.

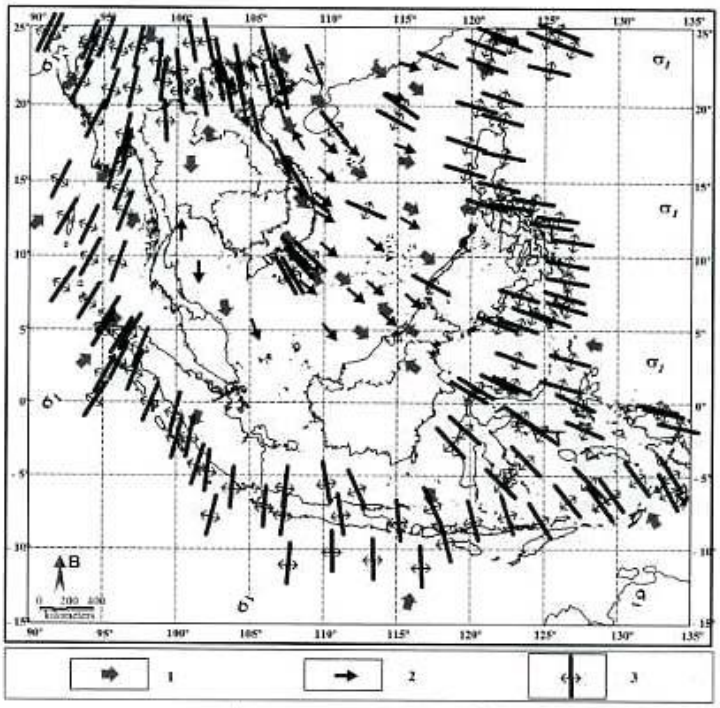
Hình 8. *Ví dụ về cơ cấu chấn tiêu của động đất Đô Lương: M = 4,7 ngày 7/01/2005.*

Từ những thông báo về cơ cấu chấn tiêu này, chúng ta có thể sử dụng trục ứng suất nén ép phục vụ cho nghiên cứu thiết lập mô hình trường ứng suất kiến tạo (Hình 9).

2. Trường ứng suất kiến tạo thạch quyển Đông Nam Á

Trên cơ sở các trục ứng suất nén ép trong Hình 9, bằng phương pháp ngoại suy theo lưới trên phần mềm MapInfo10.5 tập thể tác giả đã thiết lập mô hình mô phỏng trường ứng suất kiến tạo thạch quyển Đông Nam Á (Hình 10) và cho thấy:

Trục chính trường ứng suất nén ép cực đại nằm ngang (σ_1) trong phạm vi nội mảng thạch quyển Đông Nam Á có phương á kinh tuyến, chuyển sang đông nam về phía trung tâm Biển Đông và Boneo - Kalimantan.



Chú giải: *1- Trục nén ép của thạch quyển; 2- Trục nén ép vỏ Trái đất; 3- Trục ứng suất nén P trong động đất.*

Hình 9. *Các số liệu ban đầu phục vụ lập mô hình trường ứng suất thạch quyển Đông Nam Á.*

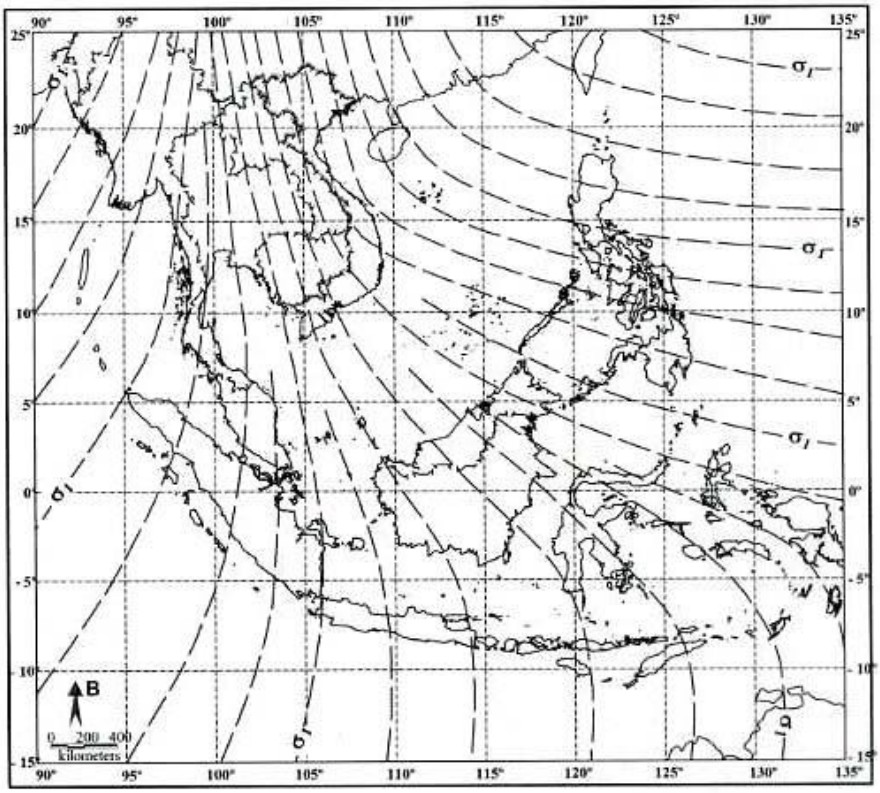
Ranh giới mảng thạch quyển Âu-Á tại khu vực Đông Nam Á chủ yếu nằm trong trạng thái ép nén (đới hút chìm Đông và Tây Philippin, đới hút chìm Sumatra-Java-Timor) đến nén ép - trượt bằng (dọc đứt gãy Saigang): Dọc theo đới hút chìm Sumatra-Java-Timor-Bird'Head và đới đứt gãy trượt bằng - nén ép Saigang chịu sự ép nén theo phương BĐB-NTN. Đới hút chìm Đông và Tây Philippin chịu sự ép nén theo hướng TTB-ĐĐN (Hình 8).

3) Các kết quả phân tích tài liệu GPS còn cho thấy sự chuyển động độc lập của khối nội mảng Đông Nam Á so với mảng Âu-Á. Như vậy, cả một phần diện tích rộng lớn nội mảng Đông Nam Á được xem như là đơn vị cấu trúc bậc một của mảng Âu-Á. Ranh giới phía bắc của phần nội mảng này là đứt gãy Sông Hồng. Mảng Nam Trung Hoa - Bắc Việt Nam chuyển dịch về phía đông nam với vận tốc nhỏ hơn 5 mm/năm.

Tốc độ hội tụ của mảng Australia và khối nội mảng Đông Nam Á theo kết quả phân tích đối sánh giữa NUVEL-1A và các phương dịch trượt của mặt đứt gãy

trong động đất cho giá trị 66-72 mm/năm. Tại các vị trí khác nhau dọc theo đứt gãy Sumatra cũng quan trắc thấy tốc độ dịch chuyển tương ứng khoảng 20-30 mm/năm (tại vị trí Cung Banda). Xuất hiện sự hội tụ tại vị trí giao cắt giữa ba giữa mảng thạch quyển Australia với phức hệ các khối liên kết của mảng Thái Bình Dương và mảng biển Philippin.

Tiến về phía đông của khu vực Đông Nam Á, quá trình hội tụ giữa mảng biển Philippin và các phần nội mảng tạo nên một đai phức hệ động. Trong khi đó ở phía tây của khu vực Đông Nam Á, sự chuyển động tương đối gần như chính bắc của mảng Ấn Độ so với Đông Nam Á với vận tốc 45-52 mm/năm. Kéo theo quá trình chuyển động về phía bắc của mảng Ấn Độ là một loạt các hoạt động khác của khu vực kề cận như quá trình mở rộng của biển Andaman, dịch chuyển trượt bằng dọc theo đứt gãy Saigang, quá trình nén ép nghiêng và tiêu biến dọc theo các đới hút chìm Andaman và Indo-Burma.



Hình 10. *Sơ đồ trường ứng suất hiện đại khu vực Đông Nam Á.*

IV. KẾT LUẬN

Trên cơ sở khái quát hóa về cấu trúc thạch quyển, manti và việc luận giải mô hình trường ứng suất kiến tạo hiện đại Đông Nam Á, tập thể tác giả có kết luận sau:

Đới hút chìm bao quanh Đông Nam Á có đặc trưng cấu trúc vận tốc sóng P theo dạng "cột" trong manti trên, lớp chuyển tiếp và lớp phân chia 1. Đới này trùng với các đới phát sinh động đất thuộc ranh giới mảng, có độ sâu chấn tiêu từ rất nông đến rất sâu. Chấn tiêu động đất sâu nhất thuộc các đới ranh giới mảng: Sumatra (650 km), Java (700 km), Timor (700 km), Philippines (700 km); thứ đến là các đới thuộc ranh giới mảng còn lại như Indo-Burma (300 km), Andaman (500 km), Hammahera (350 km), Manila (400 km), Taiwan (350 km). Động đất tại các đới

ranh giới mảng này có tần suất xuất hiện cao, cấp độ mạnh có thể đạt 9,0 (động đất Sumatra năm 2004).

Đới đứt gãy nội mảng Hải Nam - Natuna có vai trò ranh giới phân chia manti nội mảng Đông Nam Á thành 02 phần rõ rệt: Phần phía đông có biểu hiện phân lớp ngang rõ nét, trong khi tại phần phía tây có sự xáo trộn rõ rệt của mô hình vận tốc sóng P theo chiều thẳng đứng. Phần phía đông của manti nội mảng Đông Nam Á chịu tác động mạnh mẽ của dòng chảy manti từ mảng biển Philippin vào. Trong khi tại phần phía tây là sự giao thoa của các "dòng chảy manti" từ mảng Ấn-Úc và lục địa Trung Hoa.

Đới ranh giới mảng Đông Nam Á có biểu hiện vát mỏng tương đối của thạch quyển, biến đổi trong phạm vi 70-110 km và có biểu hiện phân chia thành các khối cấu trúc: 1) Myanmar (Indo-Burma, 80-100 km); 2) Nicobar (biển Andaman, 70-75 km); 3) Sumatra (75-95 km); 4) Java (80-95 km); 5) Timor (95-110 km); 6) Halmahera (95-105 km); 7) Sula (90-110 km); 8) Sulawesi (70-90 km); 9) Philippines (85-110 km); 10) Manila (95-105 km); 11) Đài Loan (80-90 km); 12) Batan (80-90 km).

Trong phạm vi nội mảng Đông Nam Á có biểu hiện biến đổi giá trị độ sâu tới đáy thạch quyển khá phức tạp và bao gồm các khối cấu trúc: 1) Sino-Burma (90-100 km); 2) Shan Thái (95-105 km); 3) Pattani (85-95 km); 4) Đông Dương (Indochina, 80-105 km); 5) Malaysia (85-95 km); 6) Natuna (100-105 km); 7) Việt-Trung (85-100 km); 8) Hoàng Sa (75-85 km); 9) Trung tâm Biển Đông (65-80 km); 10) Trường Sa (90-110 km); 11) Bắc Kalimantan (95-100 km); 12) Kalimantan (90-95 km); 13) Barito (85-90 km); 14) Banda (65-90 km); 15) Sulu (biển Sulu và biển Sulawesi, 60-90 km).

Sự xuất hiện các "dòng chảy manti" từ lục địa Trung Hoa xuống, từ mảng Ấn-Úc và mảng biển Philippin vào tạo nên sự xáo động mạnh mẽ của manti nội mảng Đông Nam Á. Biểu hiện trên mô hình vận tốc sóng P là sự thay đổi vận tốc phức tạp theo chiều ngang và thẳng đứng. Hướng dịch chuyển của các khối thạch quyển Đông Nam Á là hậu quả tác động của các "dòng chảy manti" từ manti mảng thạch quyển Ấn-Úc và biển Phillippin và lục địa Trung Hoa chảy vào.

Trục chính trường ứng suất nén ép cực đại nằm ngang (σ_1) trong phạm vi nội mảng thạch quyển Đông Nam Á có phương á kinh tuyến, chuyển sang đông nam về phía trung tâm Biển Đông và Boneo-Kalimantan. Ranh giới mảng thạch quyển Âu-Á tại khu vực Đông Nam Á chủ yếu nằm trong trạng thái ép nén (đới hút chìm Đông và Tây Philippin, đới hút chìm Sumatra-Java-Timor) đến nén ép - trượt bằng (dọc đứt gãy Saigang).

VĂN LIỆU

1. Cao Đình Triều, 1997. Một số kết quả bước đầu đánh giá vận tốc dịch chuyển và trạng thái ứng suất vỏ Trái đất lãnh thổ Việt Nam. *TC Địa chất, A/240:33-39. Hà Nội.*

2. Cao Đình Triều, Geiko V.S., Mai Xuân Bách, Thái Anh Tuấn, 2005. Bước đầu thiết lập mô hình vận tốc truyền sóng dọc (P) và trạng thái ứng suất của thạch quyển và manti Việt Nam. *Tuyển tập Báo cáo Hội nghị khoa học Kỹ thuật Địa vật lý Việt Nam lần thứ 4, Hà Nội, tr. 267-279.*

3. Cao Đình Triều, Lê Văn Dũng, Cao Đình Trọng, Nguyễn Đức Vinh, 2009. Đặc trưng hoạt động động đất ở các đới ranh giới mảng thạch quyển thuộc Đông Nam Á. *TC Địa chất, A/314:18-26. Hà Nội.*

4. Cao Đình Triều, Mai Xuân Bách, Geyko V.S., 2004. Đặc trưng phân đới cấu trúc thạch quyển Việt Nam theo tài liệu địa vật lý. *TC Địa chất, A/285:177-187. Hà Nội.*

5. Cao Đình Triều, Mai Xuân Bách, Phạm Nam Hưng, 2012. Một số nét cơ bản về cấu trúc manti và thạch quyển Đông Nam Á. *TC Địa chất, A/331-332:1-9. Hà Nội.*

6. Cao Đình Triều, Phạm Huy Long, Đỗ Văn Lĩnh, Lê Văn Dũng, Cao Đình Trọng, 2013. Địa động lực hiện đại lãnh thổ Việt Nam. *Nxb Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội, 242 tr.*

7. Cao Đình Triều, Stvetkova T., Bùi Anh Nam, Nguyễn Đức Vinh, Thái Anh Tuấn, 2009. Mô hình vận tốc sóng dọc thạch quyển và manti Đông Nam Châu Á. *TC Địa chất, A/314:1-8. Hà Nội.*

8. Cao Đình Triều, Thái Anh Tuấn, Cao Đình Trọng, 2008. Một số nét đặc trưng về kiến tạo địa chấn khu vực Đông Nam Á. *TC Địa chất, A/306:3-13. Hà Nội.*

9. Cao Dinh Trieu, Le Van Dung, Nguyen Huu Tuyen, Pham Nam Hung, 2002. Some preliminary results from study of the crustal deformatiom in Vietnam. *Journal of Geodesy and Geodynamics. Vol.22 No.1, Beijing, China, pp. 40-45.*

10. Cao Dinh Trieu, Nguyen Huu Tuyen, Le Van Dung, Pham Nam Hung, Mai Xuan Bach and Thai Anh Tuan, 2005. Evolution of faulting tectonic in Southeast Asia. *Journal of Geodesy and Geodynamics, Vol. 25, No. 1, Beijing, China, pp. 51-59.*

11. Cao Dinh Trieu, V.Starostenko, T.Tsvetkova, O.Legostaeva, L.Zaets, Pham Nam Hung, Bui Anh Nam, Le Van Dung, 2010. Lithosphere structure of Vietnam and adjacent territories based on seismic P-waves tomography and gravity - material of international conference. *Geophysical Journal, 32, №4, pp. 29-40.*

12. Geiko V.S., 1998. Taylor's approximation of wave and Eikonal equation in inverse seismic problems. *Geophys. J., 17, pp. 465-493.*

13. Geiko V.S., 2004. A general theory of seismic travel time tomography. *Geophys. J., 26/2:3-33.*

14. Inoue H., Fukao Y., Tanabe K, Ogata Y., 1990. Whole mantle P-wave travel-time tomography. *Phys. Earth Planet. Int. 59, pp. 294-328.*

15. Martinec Z., Pec K., 1990. The influence of the core-mantle boundary irregularities on the mass density distribution inside the Earth. *Geophysical data inversion methods and applications. Proceedings of VII Int.*

16. Maruyama S.H., 1994. Plume tectonics. *J. Geol. Soc. Japan. 100, № 1. pp. 24-49.*

17. Morgan W.J., 1971. *Convective plumes in the lower mantle. Nature. 230, pp. 42-43.*

18. Nataf H.C., 2000. Seismic imaging of mantle plumes. *Annual Rev. Earth Planet. Sci. p. 28, pp. 391-417.*

19. Starostenko V.I., Kendzera A.V., Bugaienko I.V., Zaiets L.N., Tsvetkova T.A., 2011. Tsunamogenic earthquake under North Sumatra. *Geophysical Journal 33, №2, pp. 3-15.*

20. Tsvetkova T., Cao Dinh Trieu, 2010. P-wave model of lithosphere and mantle of South East Asia (SEA). *Book of abstracts, 8-th General Assemble of Asian Seismological Commission. Hanoi, pp. 112-113.*

21. Zayets L.N., Tsvetkova T.A., Bugaenko I.V., Shumlyanskaya L.A. 2009. Three-dimensional P-velocity model of the upper mantle of Indo-Chine and surroundings. *Geophysical Journal 31, №2, pp. 47-60.*

22. Zaiets L., Tsvetkova T., Bugaienko I., Shumlyanskaya L., 2010. Influence of surroundings features on the velocity structure of mantle under South-East Asia from data of seismic tomography - material of international conference "Geodynamical phenomena:from observations and

experiments to theory and modelling". *Geophysical J. 32, №4, pp. 210-212.*

23. Старостенко В.И., Лукин А.Е., Цветкова Т.А., Заец Л.Н., Донцов В.В., Савиных Ю.В., 2011. Об участии суперглубинных флюидов в нафтидогенезе (по данным узучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр). *Geophysical Journal 33, №4, pp. 3-32.*

24. Заец Л.Н., 2011. Скоростные границы в мантии Юго-Восточной Азии и Южного Китая. *Geophysical Journal 33, №1. pp. 62-71.*

25. Заец Л.Н., Као Динг Тру, Цветкова Т.А., 2012. Скоростное строение мантии и сверглубинные флюиды Юго-Восточной Азии. *Geophysical Journal 34, №4, pp.108-127.*

SUMMARY

Interpretation of the Mantle movement and lithosphere stress field of the South East Asia according to the P wave tomography

Cao Đình Triều, Đặng Thanh Hải, Lê Văn Dũng, Cao Đình Trọng

In this paper, the authors expound the mantle movement and lithosphere stress pattern of the South East Asia according to the P wave tomography. The obtained results have shown that: The surrounded subduction zones of the South East Asia have been characteristic as the vertical mantle fluid in the upper mantle, transitional and layer 1. The earthquake concurrency in this zone are high frequency and rather strong in comparison ones in the intra-plate region. This boundary zone characterizes by the relative pinching out of the lithosphere (with the depth from 70 to 110 km) and can be divided into the following blocks: 1/ Myanmar (Indo-Burma - 80-100 km); 2/ Nicobar (Andaman Sea - 70-75 km); 3/ Sumatra (75-95 km); 4/ Java (80-95 km); 5/ Timor (95-110 km); 6/ Halmahera (95-105 km); 7/ Sulu Sea (90-110 km); 8/ Sulawesi (70-90 km); 9/ Philippines (85-110 km); 10/ Manila (95-105 km); 11/ Taiwan (80-90 km); 12/ Bataan (80-90 km); The Hai Nam - Natuna deep fault zone plays role as the separation line to devise the mantle of the South East Asia into two parts: east and west parts. In the east part of the South East Asia mantle, the P wave velocities are changing sharply in the vertical. Meanwhile, in the west part, the P wave velocities are changeable chaotically. The South East Asia intraplate is characterized by very complicated structures of the lithosphere and can be divided into the following blocks: 1/ Sino-Burma (90-100 km); 2/ Shan Thai (95-105 km); 3/ Battani (85-95 km); 4/ Indochina (80-105 km); 5/ Malaysia (85-95 km); 6/ Natuna (100-105 km); 7/ South China - North Việt Nam (85-100 km); 8/ Hoàng Sa (75-85 km); 9/ Centre of Việt Nam East Sea (65-80 km); 10/ Trường Sa (90-110 km); 11/ North Kalimantan (95-100 km); 12/ Kalimantan (90-95 km); 13/ Barito (85-90 km); 14/ Banda (65-90 km); 15/ Sulu (Sulu Sea and Sulawesi Sea, 60-90 km). The "mantle flows" are the reason of the South East Asia lithosphere horizontal movement. The maximum stress axis (σ_1) has the direction from north to south in the north part of the South East Asia. This direction has traieds and have north-east direction in the centure of Việt Nam East Sea. The surrounded subduction zones of the South East Asia are laying under the state of compression (Manila trench, Philippine trench, Sumatra-Java-Timor trench) and shearing (Saigang fault zone).

Người biên tập: PGS.TS Nguyễn Văn Vượng.