

TRƯỜNG ỨNG SUẤT HIỆN ĐẠI VÀ XU THẾ DỊCH CHUYỂN TƯƠNG ĐỐI VỎ TRÁI ĐẤT KHU VỰC QUẦN ĐẢO HOÀNG SA VÀ LÂN CẬN

Trần Tuấn Dũng^{1,2,*}, Kulinich R. G.³, Ngô Thị Bích Trâm⁴, Nguyễn Quang Minh¹,
Nguyễn Bá Đại¹, Trần Tuấn Dương¹, Nguyễn Thái Sơn⁵

¹Viện Địa chất và Địa vật lý biển, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam

²Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam

³Viện Hải dương học Thái Bình Dương, Viện Hàn lâm Khoa học Nga, Liên bang Nga

⁴Cục bản đồ-Bộ Tổng tham mưu, Hà Nội, Việt Nam

⁵Viện Địa lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam

*E-mail: trantuongdung@yahoo.com

Ngày nhận bài: 27-1-2018; Ngày chấp nhận đăng: 27-4-2018

Tóm tắt. Trường ứng suất hiện đại khu vực quần đảo Hoàng Sa và lân cận được xác định bằng các tham số cơ cấu chấn tiêu động đất ghi nhận được từ hơn 100 năm qua. Các tham số hình học đứt gãy (như là vị trí, phương vị, góc dốc, hướng trượt và độ sâu...) được xác định bằng trường trọng lực vệ tinh, địa chấn và trường ứng suất. Trong nghiên cứu này, các dự đoán về độ lớn và xu thế dịch chuyển tương đối vỏ Trái đất được thực hiện bằng cách tính toán và đánh giá mối quan hệ giữa trường ứng suất hiện đại và các tham số đứt gãy. Trên những cơ sở về xu thế và độ lớn đó, có thể xây dựng lại cơ chế kiến tạo địa động lực qua các thời kỳ địa chất khác nhau của khu vực quần đảo Hoàng Sa và lân cận. Ở đây, độ lớn và xu thế dịch chuyển tương đối vật chất vỏ Trái đất được thể hiện bằng phổ màu và độ lớn vectơ. Mặc dù sự dịch chuyển xuất hiện trên toàn khu vực, nhưng có sự khác nhau về xu thế và cường độ tại những vùng riêng biệt, ở đó hệ thống đứt gãy tồn tại ở các cấp độ khác nhau.

Từ khóa: Quần đảo Hoàng Sa, trường trọng lực vệ tinh, trường ứng suất hiện đại, cơ cấu chấn tiêu động đất, dịch chuyển tương đối vỏ Trái đất.

GIỚI THIỆU CHUNG

Nhìn chung, trong nghiên cứu kiến tạo, trường ứng suất ở mỗi khu vực đều có những tham số đặc trưng khác nhau. Chúng biến đổi theo thời gian, phụ thuộc vào sự tương tác của các mảng kiến tạo hoặc sự thay đổi trạng thái và chế độ địa nhiệt trong vỏ Trái đất. Trường ứng suất đóng một vai trò quan trọng trong hình thành các đứt gãy cũng như qui định hành vi trượt của đứt gãy gây nên sự dịch chuyển, biến dạng vỏ Trái đất. Do đó, dựa vào nghiên cứu hình thái, động học của đứt gãy trong mối liên hệ với trường ứng suất kiến tạo hiện đại, chúng ta có thể đánh giá

được xu thế hoạt động của đứt gãy trong quá khứ và tương lai, qua đó có thể phân vùng dự báo trượt lở đáy biển, các tai biến tự nhiên khác trên biển...

Lý thuyết về hành vi trượt của đứt gãy được nhắc đến lần đầu bởi Wallace, R. E., (1951) và Bott, M. H. P., (1959) [1]. Trong đó, các tác giả đưa ra giả thuyết rằng hướng trượt song song với phương ứng suất trên mặt trượt đứt gãy (ứng suất trượt mặt). Với giả thuyết này, hành vi trượt của đứt gãy có thể được xác định trong một trường ứng suất xác định. Sau này, giả thuyết trên được biết đến rộng rãi với cái tên ‘giả thuyết Wallace-Bott’

và được sử dụng như là một phương pháp cổ điển trong mô hình giải bài toán ngược ứng suất.

Giả thuyết Wallace-Bott được tiếp tục nghiên cứu và phát triển bởi McKenzie (1969) [2]. Nghiên cứu [2] đã đưa ra những bằng chứng rằng, các trận động đất hầu hết xảy ra trên các đứt gãy đã được hình thành trước khi động đất xảy ra. Từ đó, ý tưởng về việc sử dụng tài liệu cơ cấu chấn tiêu động đất (CCCT) để xác định hành vi trong quá khứ của đứt gãy đã được đưa ra nghiên cứu một cách rộng rãi.

Giả thuyết nêu trên tiếp tục được kế thừa và phát triển thành phương pháp nghiên cứu sự tái hoạt động của đứt gãy (Angelier và nnk, 1990; Morris và nnk, 1996) [3, 4]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng phương trượt đứt gãy không chỉ phụ thuộc vào phương của ứng suất chính mà còn phụ thuộc vào tỷ số ứng suất $\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$; đồng thời, xu thế trượt được xác định bởi tỷ số giữa ứng suất trượt mặt và ứng suất pháp tuyến xảy ra trên một mặt đứt gãy. Đây là tiền đề quan trọng cho các nghiên cứu tiếp sau về đứt gãy hoạt động hoặc tái hoạt động [2, 5–7]. Kết quả từ các nghiên cứu trên cho thấy sự phù hợp của phương pháp trong xác định chế độ hoạt động của đứt gãy. Tuy nhiên, các nghiên cứu đó vẫn chưa đề cập đến tác động ảnh hưởng của dịch chuyển đứt gãy lên vỏ Trái đất. Năm 1980, Aki, K., và Richards, P. G., (1980), đã đưa ra một số tiêu chuẩn qui ước về các tham số động học của đứt gãy dựa trên các cơ cấu chấn tiêu động đất [8]. Trong bài báo này, các tác giả sẽ sử dụng các tiêu chuẩn trong [8] để xác định và thể hiện các tham số đứt gãy trong khu vực nghiên cứu.

Năm 2004, Nguyễn Văn Vượng và nnk., đã nghiên cứu xác định bản chất của biến dạng nội mảng và chuyển dịch hiện đại có thể đã xảy ra dọc các hệ đứt gãy khu vực Tây Bắc Việt Nam dưới tác động của trường ứng suất nhằm phân vùng và dự báo động đất cũng như các tai biến tự nhiên liên quan. Kết quả nghiên cứu đó đã xác lập được các đặc trưng biến đổi trường ứng suất với chuyển dịch tương đối của các yếu tố cấu trúc trong không gian. Dựa vào đó, một số

vị trí chấn tiêu động đất cũng được dự báo cho dài dọc theo một số đứt gãy chính trong khu vực [9].

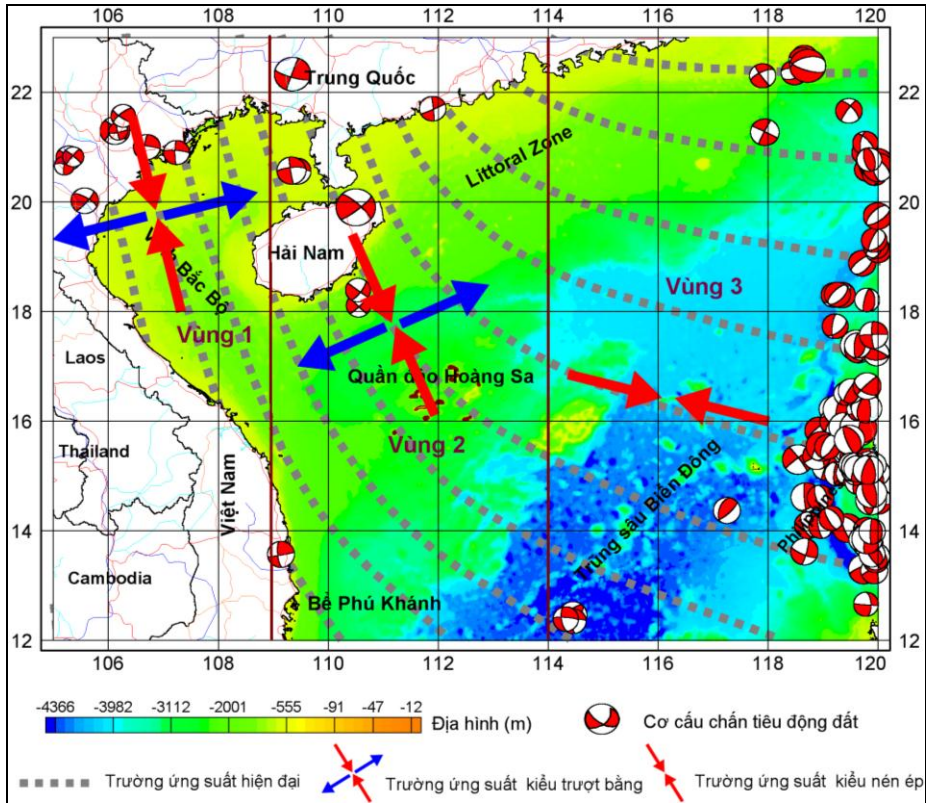
Năm 2015, Trần Tuấn Dũng và nnk., đã dựa trên trường ứng suất hiện đại và kết hợp cùng với các tham số động học đứt gãy xác định được xu thế dịch chuyển ngang và thẳng đứng tương đối của vỏ Trái đất. Trên cơ sở dịch chuyển đó, các tác giả đã tiến hành đánh giá và phân vùng dự báo được khả năng trượt lở ngầm đáy biển khu vực bể Phú Khánh và lân cận [10].

Khu vực nghiên cứu nằm trong mảng Âu-Á; các cơ cấu chấn tiêu của các trận động đất nội mảng đã được ghi lại và phân bố khá đều trên toàn khu vực. Trong nghiên cứu này, trường ứng suất khu vực được xác định bằng tài liệu cơ cấu chấn tiêu ghi được trong hơn 100 năm qua. Các tham số đứt gãy (vị trí, phương vị, góc dốc và độ sâu) được xác định bằng phương pháp trọng lực và địa chấn. Sau đó, các tham số hình động học của các đứt gãy (như vector trượt và xu thế trượt, hướng trượt) được tính toán thông qua trường ứng suất khu vực hiện đại. Trên cơ sở đó, xu thế biến dạng dịch chuyển hiện tại theo phương ngang và phương thẳng đứng của vỏ Trái đất được xác định.

CƠ SỞ DỮ LIỆU

Cơ cấu chấn tiêu động đất. Dữ liệu cơ cấu chấn tiêu động đất được thu thập từ nhiều nguồn khác nhau; trong đó, chủ yếu từ Dự án cơ cấu chấn tiêu toàn cầu (CMT) Project (41 trận từ năm 1976–2016) [11] và bổ sung thêm từ nghiên cứu của Bùi Công Quế và nnk (2010) (4 trận từ năm 1903–1988) [12]. Các cơ cấu chấn tiêu động đất này đều là động đất nội mảng, được thu nhận ở độ sâu ≥ 5 km và cường độ $M \geq 3$ (hình 1).

Nghiên cứu này sử dụng 93 cơ cấu chấn tiêu động đất ghi nhận được trong khu vực. Tuy nhiên, trong khuôn khổ bài báo, chỉ biểu diễn một vài ví dụ về cơ cấu chấn tiêu động đất được thể hiện trong [11, 12] (bảng 1).



Hình 1. Trường ứng suất khu vực hiện đại xác định theo tài liệu động đất

Bảng 1. Cơ cấu chấn tiêu động đất [11, 12]

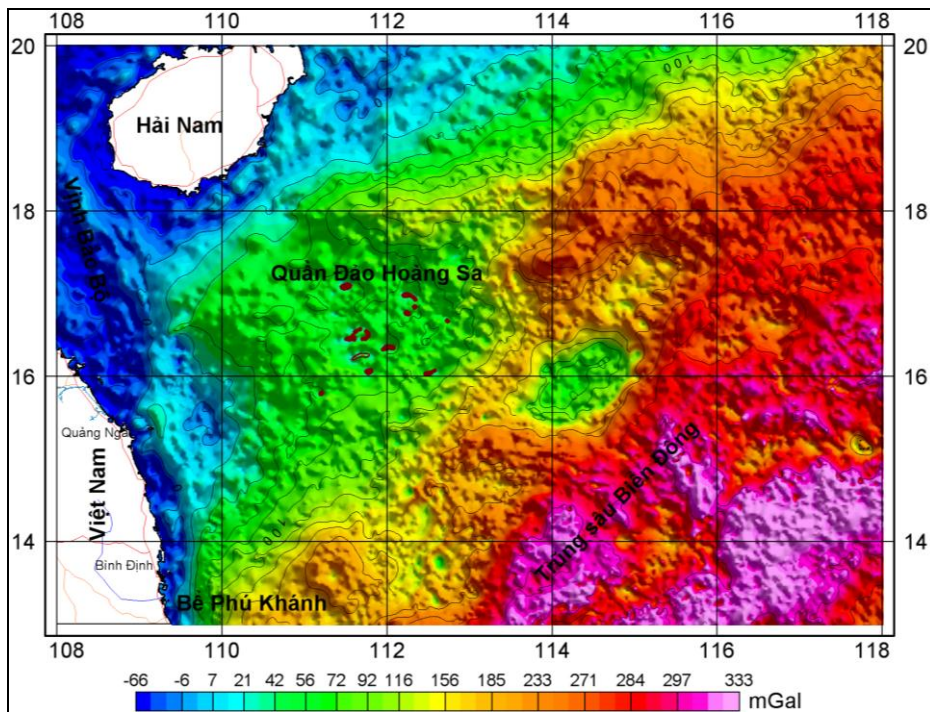
TT	Thời gian	Vĩ độ	Kinh độ	Độ sâu chấn tiêu (km)	Cường độ động đất M_w	Tham số nguồn động đất			Phương nén ép ngang cực đại S_{Hmax}	Trạng thái ứng suất	Cơ cấu chấn tiêu
						Góc phương vị	Góc dốc	Góc trượt			
1	1905/7/13	110,5	19,9	-	7,5	313	66	160	2	TB	
2	1969/12/17	110,55	18,11	33	4,7	45	78	-6	0	TB	
3	1977/8/29	119,61	17,38	24,6	6,3	1	41	70	104	TN	
4	1995/1/10	109,33	20,57	15	5,5	264	64	-173	127	TB	
...
93	2015/11/7	119,8	16,64	61,5	5,4	121	35	161	174	TB	

Ghi chú: TB: Trượt bằng; TN: Trượt nghịch.

Dữ liệu địa chấn. Trong những năm gần đây, trên vùng biển Việt Nam, bằng các dự án khảo sát trong nước và các hợp tác quốc tế, đã có thêm rất nhiều kết quả điều tra, khảo sát mới về địa chất và địa vật lý biển với độ chi tiết và vùng bao phủ rộng hơn, đặc biệt là tài liệu địa chấn thăm dò. Trong nghiên cứu này kết hợp khai thác các nguồn tài liệu địa chấn từ các dự án khảo sát, đó là: AW-HS; PK-03; PGS-08, 09; WA-74; NOPEC-93; VOR-93; SEAS-95; SEAS-TC; TC-93, 95, 98; TC-03, 06; VGP-09, PV-08, STC-06; CPV-05, 07; PKBE-07, 08. Các nguồn tài liệu nói trên cũng đã được tổng hợp, so sánh trong nghiên cứu của đề tài KC.09-25/06-10, 2009-2010 [13]. Có thể nói, đây là những nguồn số liệu có độ tin cậy, có giá trị bổ sung vào nghiên cứu chi tiết và chính xác hóa cấu trúc kiến tạo, xác định các tham số đặc trưng đứt gãy kết hợp cùng với tài liệu trọng lực [10, 12, 14].

Tài liệu trọng lực. Tài liệu dị thường trọng lực khu vực quần đảo Hoàng Sa và lân cận được thu thập chủ yếu từ các chuyến khảo sát chung giữa Việt Nam và các quốc gia khác như Nga, Mỹ, Pháp, Đức, Nhật Bản... và từ một số đề tài cấp Nhà nước được thực hiện bởi Viện Địa chất và Địa vật lý biển cùng các viện nghiên cứu khác. Các đề tài đã hoàn thành và đưa ra được những kết quả mới với các bản đồ dị thường trọng lực tỷ lệ 1:250.000, 1:500.000 cho toàn bộ khu vực [6, 22]. Bên cạnh đó, còn có nguồn số liệu trọng lực từ đo cao vệ tinh có độ phân giải đồng nhất, chấp nhận được cả về độ chính xác, thời gian và kinh phí thực hiện, đặc biệt là đối với những vùng nhạy cảm trên biển Đông, với độ phân giải $1' \times 1'$ [15].

Trong nghiên cứu này, các tác giả sử dụng nguồn tài liệu trọng lực tích hợp từ đo cao vệ tinh và đo đạc thành tàu đưa ra bộ dữ liệu với độ phân giải đồng nhất cho khu vực quần đảo Hoàng Sa và lân cận, tỷ lệ 1:250.000 (hình 2) [10, 15, 16].



Hình 2. Dị thường trọng lực Bughe

PHƯƠNG PHÁP ÁP DỤNG

Nghiên cứu và xác định trường ứng suất khu vực hiện đại và các tham số hình học đứt

gãy (vị trí, phương vị, góc dốc...) khu vực quần đảo Hoàng Sa và lân cận là một vấn đề phức tạp, không thể giải quyết với chỉ một phương

pháp duy nhất. Tổ hợp các phương pháp nghiên cứu cần phải có cái nhìn tổng quát nhất về mối quan hệ giữa trường ứng suất hiện đại và hệ thống đứt gãy. Dựa trên mối quan hệ đó, cường độ và xu thế trượt dịch chuyển tương đối theo phương ngang và thẳng đứng của vật chất vỏ Trái đất có thể được xác định. Với mục tiêu đó, bài báo này áp dụng một số phương pháp sau:

Xác định các tham số hình học đứt gãy bằng tài liệu trọng lực. Hình thái cấu trúc hệ thống các đứt gãy trên khu vực Biển Đông nói chung và vùng nghiên cứu nói riêng, cho đến nay vẫn là một vấn đề đã và đang được quan tâm nghiên cứu bởi nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước. Trong bài báo này, ngoài các kết quả minh giải đứt gãy từ tài liệu địa chấn (tham khảo của các đề tài nghiên cứu giai đoạn trước) [7, 13, 14], để có được bức tranh phân bố không gian hệ thống đứt gãy từ trên xuống dưới thì phương pháp trọng lực được áp dụng kết hợp.

Các tham số hình học của các đứt gãy được xác định bằng tài liệu trọng lực, nghiên cứu này sử dụng hai phương pháp, đó là:

Lọc trường theo tần số. Nhìn chung, thành phần tần số cao của trường trọng lực tương ứng với bước sóng ngắn thường liên quan đến các thể địa chất tầng nông. Ngược lại, thành phần tần số thấp của trường trọng lực với bước sóng dài thường phản ánh các cấu trúc địa chất tầng sâu hơn. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã áp dụng phương pháp lọc trường theo tần số, được giới thiệu trong nghiên cứu của Trần Tuấn Dũng và nnk., 2016 [17], nhằm phân tách hiệu ứng trọng lực của các tầng cấu trúc ở độ sâu khác nhau từ dị thường trọng lực Bughe.

Bộ lọc trường tần số thấp dị thường trọng lực được tính theo công thức [17]:

$$F\{\Delta g_{LF}(x, y)\} = F\{H(x, y)\}F\{\Delta g(x, y)\} \quad (1)$$

Trong đó: $F\{\}$ là biến đổi Fourier; $\Delta g_{LF}(x, y)$ là dị thường tần số thấp được lọc bởi toán tử $H(x, y)$; $\Delta g(x, y)$ là dị thường trọng lực Bughe đầy đủ; $H(x, y)$ là toán tử lọc trường tần số thấp.

Toán tử lọc trường tần số thấp Gaussian được biểu diễn:

$$H(x, y) = e^{-D(x,y)^2/2\lambda^2} \quad (2)$$

Trong đó: $D(x, y)$ là khoảng cách giữa các điểm (x, y) trên lưới với điểm trung tâm của cửa sổ lọc; λ là bước sóng cut-off.

Sau khi áp dụng lọc trường tần số thấp cho nhiều bước sóng λ khác nhau, dị thường trọng lực tương ứng với các bước sóng này sẽ được sử dụng để xác định các đặc trưng đứt gãy ở các độ sâu khác nhau (độ sâu, hướng cắm, phương phát triển...).

Cực đại gradient ngang trọng lực. Các điểm cực đại gradient ngang trọng lực (MGHG) cho thấy những dấu hiệu về ranh giới mật độ đất đá, mà theo quan điểm về minh giải trọng lực, người ta có thể coi đó là các đứt gãy. Các đứt gãy thường được thể hiện bằng các điểm MGHG liên tục và dải vector chỉ phương theo cùng một hướng. Khối đất đá có mật độ cao hơn xung quanh sẽ được chỉ ra bởi các vec-tơ chỉ phương MGHG hướng vào phía trung tâm khối [14, 18].

Trong bài báo này, các tác giả áp dụng phương pháp được giới thiệu trong nghiên cứu của Blakely, R. J., và Simpson, R. W., (1986) [18], Trần Tuấn Dũng (2013) [14] xác định vị trí và độ lớn của MGHG, công thức tính được biểu diễn:

$$X_{Max} = \frac{bd}{2a} \quad (3)$$

$$G_{Max} = aX_{Max}^2 + bX_{Max} + H[\Delta g]_{i,j} \quad (4)$$

Trong đó: d là khoảng cách giữa các nút lưới số liệu; a, b là hệ số khai triển của hàm bậc hai được tính toán trên lưới dị thường trọng lực, $H[\Delta g]_{i,j}$ là gradient ngang trọng lực.

Bằng việc phân tích, liên kết vị trí và cường độ của các điểm MGHG theo cách thức phù hợp, sẽ đưa ra được một bức tranh tổng thể về phân bố không gian hệ thống các đứt gãy.

Xác định trường ứng suất khu vực hiện đại và xu thế trượt của đứt gãy

Xác định trường ứng suất. Trường ứng suất khu vực hiện đại được đặc trưng bởi các CCCT của các trận động đất trong khu vực và lân cận [11, 12]. Khu vực nghiên cứu được chia thành ba phân vùng riêng, dựa trên sự tương đồng về đặc điểm cơ chế CCCT.

Ở đây, phương pháp giải ngược ứng suất đề xuất bởi Angelier, J., (1990), được sử dụng để tính toán trường ứng suất từng phân vùng nói trên. Cơ sở của phương pháp dựa này dựa theo giả thuyết của Wallace-Bott: Ứng suất trượt song song với hướng trượt trên mặt đứt gãy [1]. Với giả thuyết này thì trường ứng suất của từng phân vùng sẽ được biểu diễn bằng một tensor ứng suất giản lược T - là một ma trận đối xứng 3×3 [3]. Khi có T , phương của ba trục ứng suất chính và độ lớn tương đối ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) được xác định bằng công thức sau:

$$(T - \sigma_p) \cdot \vec{n} = 0 \quad (5)$$

Hay một cách tường minh:

$$\left(\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} - \sigma_p \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Trong đó: σ_p là độ lớn tương đối của ứng suất chính; \vec{n} là vectơ ứng suất đơn vị tương ứng.

Do T là ma trận đối xứng dương nên tương quan độ lớn σ_p được xác định là nghiệm của phương trình sau:

$$\sigma_p^3 - I_1 \sigma_p^2 + I_1 \sigma_p - I_3 = 0 \quad (6)$$

Ở đây:

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xz} \\ \tau_{zx} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

Ứng với mỗi giá trị σ_p sẽ xác định được một độ lớn tương đối ứng suất chính và hướng tương ứng, đồng thời tỷ số ứng suất được xác định là:

$$\phi = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (7)$$

Như vậy, ngoài việc xác định được tỷ số ứng suất (ϕ), phương pháp này còn chỉ ra được hướng ba trục ứng suất chính, đặc biệt với những tập hợp ít số liệu. Điều này có ý nghĩa thực tế đối với giải bài toán ngược trường ứng suất trên biển. Delvaux và nnk., (2010) đã chỉ ra rằng với phương pháp này, chỉ cần tối thiểu 5 lời giải cơ cấu chân tiêu động đất cũng có thể xác định được cơ chế ứng suất khu vực [19].

Xác định vector trượt và xu thế trượt trên mặt đứt gãy. Khi có tỷ số ứng suất ϕ và hướng của các trục ứng suất chính $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, sẽ xác định ứng suất trượt mặt (σ_s) và ứng suất pháp tuyến (σ_n) trên mặt đứt gãy như sau [20]:

$$\sigma_s = \left[(1 - \phi)^2 l^2 m^2 + \phi^2 m^2 n^2 + n^2 l^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\sigma_n = k_1 \left(\frac{\phi + 1}{2} - (1 - \phi)m^2 - n^2 \right) \quad (9)$$

Trong đó: l, m, n là giá trị *cosin* của góc giữa pháp tuyến mặt trượt với các trục ứng suất chính; $k_1 = \sigma_1 - \sigma_2$; ϕ là góc ma sát trượt. Từ đó, hướng trượt được xác định dựa vào ứng suất trượt mặt theo giả thuyết Wallace-Bott.

Xu thế trượt theo trường ứng suất khu vực trên mặt đứt gãy được định nghĩa là tỷ số giữa ứng suất trượt mặt và ứng suất pháp tuyến của mặt đó. Hướng trượt của đứt gãy được giả định là song song với phương của ứng suất trượt mặt [4, 7]. Các bước tiếp theo sau của nghiên cứu này sẽ tuân theo các giả định nói trên.

Xu thế trượt (T_s) được sử dụng để xác định mức độ dịch chuyển tương đối giữa các cánh đứt gãy. T_s được Yukutake Y., và nnk., công bố năm 2015, biểu diễn theo công thức [7]:

$$T_s = \frac{|\sigma_s|}{\mu |\sigma_n|} \quad (10)$$

Trong đó: σ_s và σ_n là ứng suất trượt mặt và ứng suất pháp tuyến của đứt gãy; μ là hệ số ma sát trên mặt đứt gãy. Hệ số ma sát trên mặt đứt gãy ở đây được lựa chọn là $\mu = 0.65$ (dựa theo công bố của Schellart W. P., 2000) [21].

Do hệ số ma sát đã được đưa vào công thức (10), nên giá trị xu thế trượt càng lớn thì cường

độ ứng suất trượt càng tiệm cận với lực ma sát. Một đứt gãy mà xu thế trượt có giá trị càng lớn thì càng không ổn định trong mối quan hệ với trường ứng suất khu vực.

Xác định xu thế dịch chuyển vỏ Trái đất. Cơ sở lý thuyết về đặc trưng biến dạng dịch chuyển vật chất vỏ trái đất dưới tác động tổng hợp của ứng suất khu vực và hành vi của các đứt gãy đã được trình bày chi tiết trong công

trình nghiên cứu của của Okada Y., (1992) [22]. Dựa trên cơ sở phương pháp được giới thiệu bởi Steketee, J. A., (1958), Okada Y., đã đưa ra cách tiếp cận mới trong tính toán trường dịch chuyển [23].

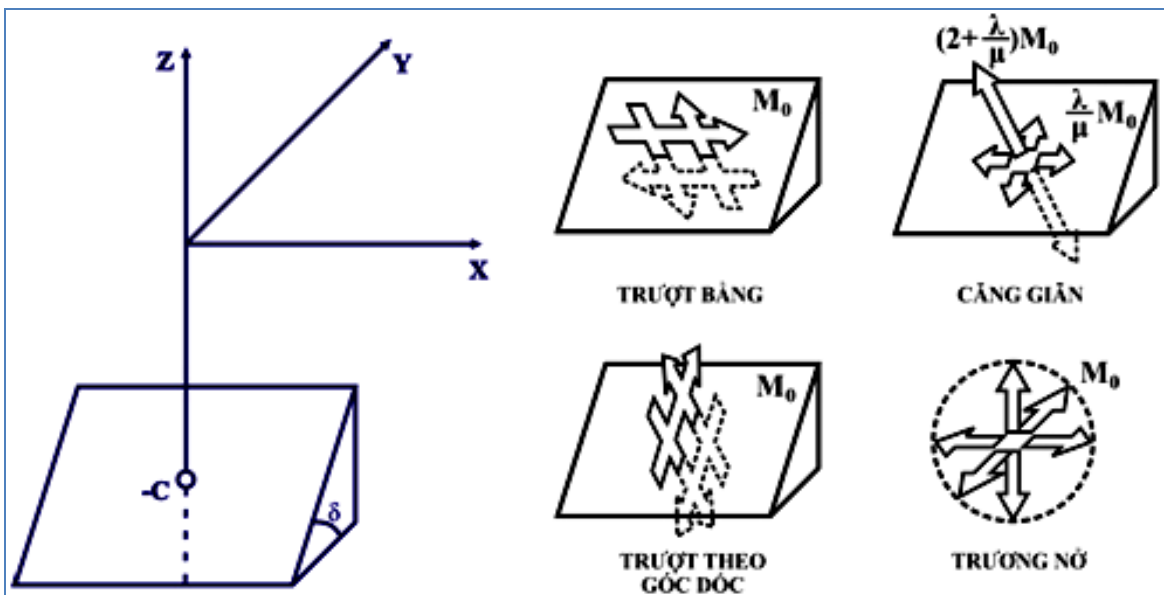
Theo đó, trường dịch chuyển $u_i(x_1, x_2, x_3)$ gây bởi một đoạn đứt gãy $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ cắt qua một bề mặt Σ trong một môi trường đồng nhất, được biểu diễn bởi công thức [22, 23]:

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (11)$$

Ở đây: v_k là vector chỉ phương của pháp tuyến với bề mặt $d\Sigma$, ví dụ $(0, -\sin\delta, \cos\delta)$; λ là hằng số Lamé; δ_{ij} là delta Kronecker.

Dựa trên công thức (11) và quan hệ tương đương khối lực, trường dịch chuyển nội tại (u^o)

gây bởi mỗi điểm nguồn có thể được biểu diễn bằng tổng hợp lực từ các nhân căng giãn $\partial u^j / \partial \xi_k$. Các điểm nguồn gây ra trường dịch chuyển có thể chia ra làm bốn loại chính (hình 2).



Hình 3. Bốn điểm nguồn cơ bản gây ra trường dịch chuyển [22]

Trường dịch chuyển theo công thức (11) được phát triển bởi Toda, S., và nnk., (2005), tích hợp tính toán trong phần mềm mã nguồn mở Coulomb [6]. Trong nghiên cứu này, trường dịch chuyển vật chất trong vỏ Trái đất được coi là một đại lượng tương đối, không có thứ nguyên, giá trị dịch chuyển tương đối theo

phương ngang và thẳng đứng được gán từ 0 đến 1 và từ -1 đến 1. Trong trường hợp dịch chuyển tương đối theo phương thẳng đứng, khi giá trị biến đổi trong khoảng -1 đến 0 thì xu thế dịch chuyển hướng xuống dưới và ngược lại.

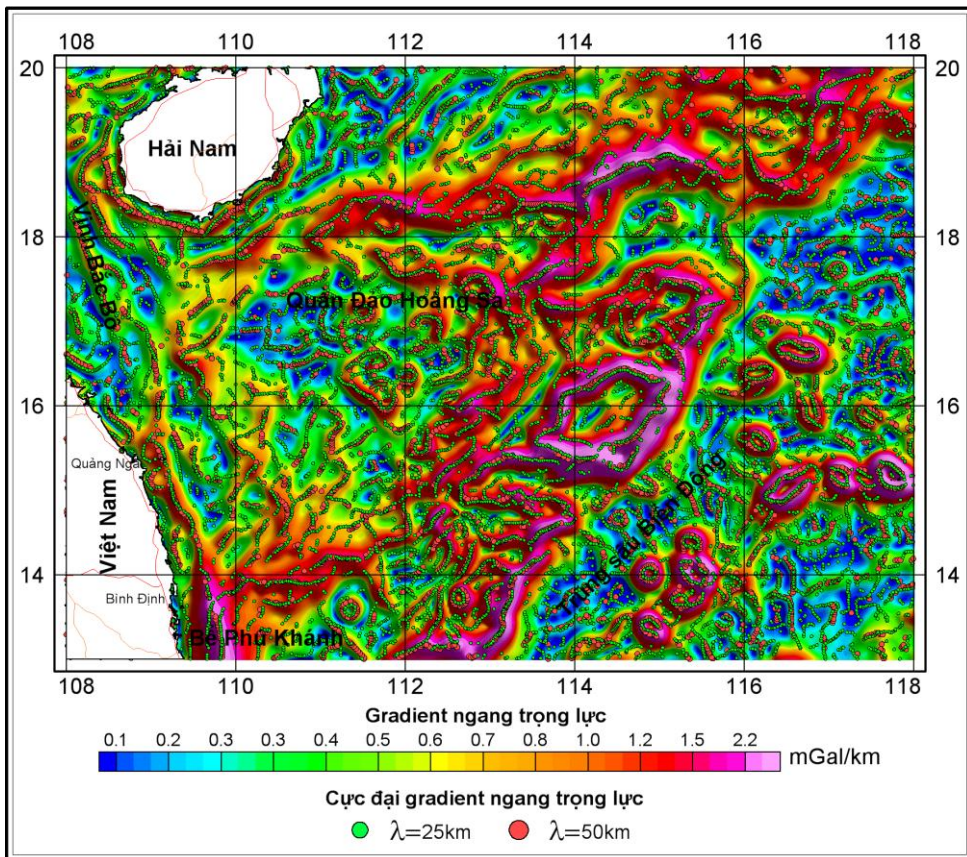
KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hệ thống đứt gãy. Đối với nghiên cứu đứt gãy dựa trên dữ liệu dị thường trọng lực, phân bố không gian của các điểm MGHG được coi là phân bố của hệ thống đứt gãy và ranh giới mật độ đất đá. Theo các nghiên cứu [10, 14] về mô hình 3D dị thường trọng lực thì trường trọng lực ở mức lọc trường $\lambda = 75$ km được cho là phản ánh tốt nhất cấu trúc địa chất trong tầng Miocen-hiện đại của khu vực nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, dị thường trọng lực Bughe được lọc với các bước sóng $\lambda = 25, 50, 75, 100$ km (xem hình 4–5) được sử dụng tương ứng để tính toán gradient ngang và cực đại gradient ngang trường trọng lực. Ở đây, sự lựa chọn các bước sóng nêu trên chỉ đơn giản với mục đích nhận được một bức tranh chung về phân bố không gian của hệ thống các đứt gãy ở những độ sâu khác nhau.

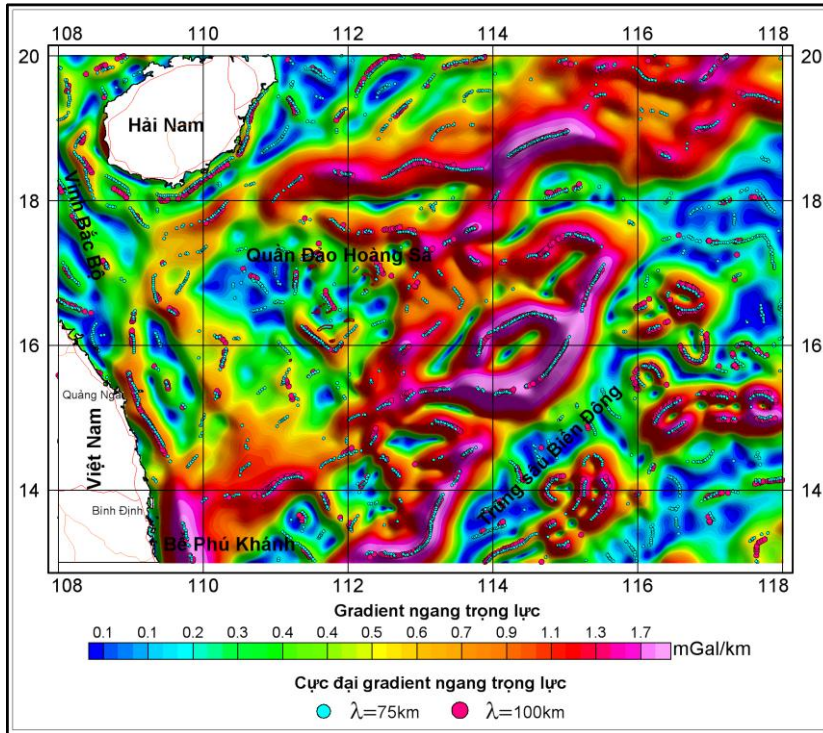
Thông thường, khi minh giải tài liệu trọng lực thì các tham số không gian đứt gãy (như là

vị trí, phương vị, góc dốc, độ sâu) được xác định dựa trên phân bố của MGHG theo độ sâu khác nhau (hình 4–5). Các đứt gãy thường được thể hiện bằng dải các điểm MGHG và vector chỉ phương của chúng theo cùng một hướng. Bằng việc phân tích, kết nối các vị trí và độ lớn của MGHG theo phương thức phù hợp, kết hợp với kết quả minh giải địa chấn thăm dò, phân bố không gian của hệ thống đứt gãy được đưa ra trên hình 6.

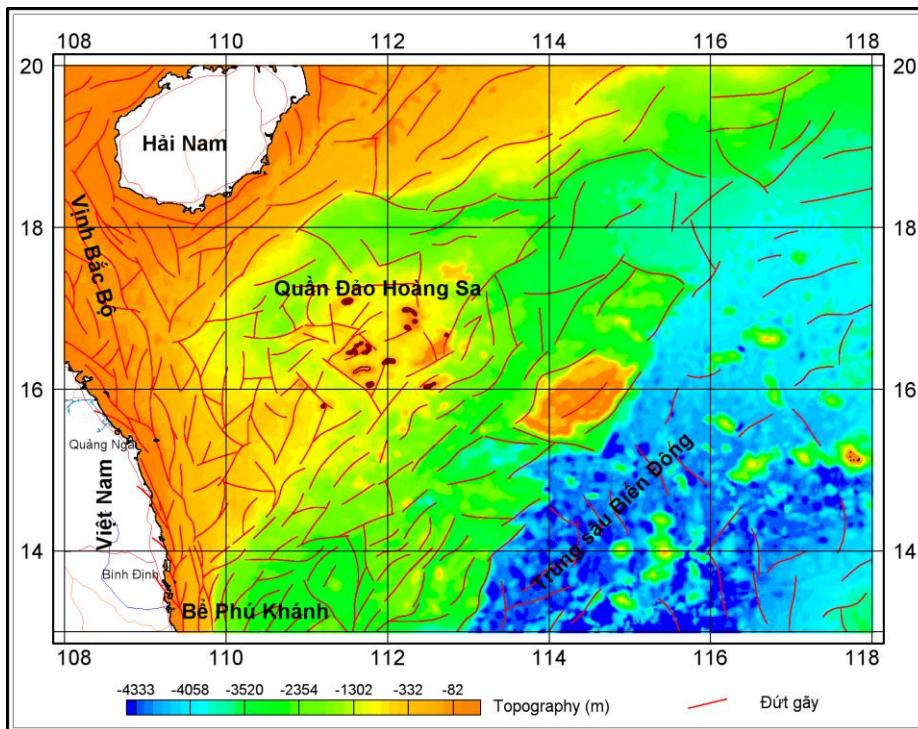
Trong nghiên cứu này, hệ thống đứt gãy được sử dụng là từ minh giải tài liệu cực đại gradient ngang trọng lực (đối với những nơi chưa có hoặc thừa số liệu địa chấn) trên hình 4 và hình 5 của các tác giả và từ minh giải tài liệu địa chấn của các nghiên cứu trước [13, 16]. Vì vậy, ở đây sẽ không tập trung vào mô tả chi tiết các đặc điểm của chúng. Tổng hợp các tham số hình học của hệ đứt gãy trong Miocen-Hiện đại được biểu diễn trên hình 6 và bảng 2.



Hình 4. Gradient ngang (bước sóng lọc trường $\lambda = 50$ km) và cực đại gradient ngang trọng lực (bước sóng lọc trường $\lambda = 25, 50$ km)



Hình 5. Gradient ngang (bước sóng lọc trường $\lambda = 75$ km) và cực đại gradient ngang trọng lực (bước sóng lọc trường $\lambda = 75, 100$ km)



Hình 6. Phân bố hệ thống đứt gãy

Bảng 2. Tham số hình học của các đứt gãy dùng cho mô hình tính toán

STT	Điểm đầu		Điểm cuối		Đường phương	Góc cắm	Hướng trượt	Kiểu trượt	Cận trên (km)	Cận dưới (km)	Xu thế trượt T_s
	Kinh độ	Vĩ độ	Kinh độ	Vĩ độ							
Vùng 1											
1	106.477	20.665	107.245	20.331	113	70	-112	Th-Ph	2	8	0.13
2	106.954	19.700	107.792	18.899	134	72	-177	Ph	2	8	0.41
3	106.363	19.897	105.531	20.426	302	77	84	Ng	2	8	0.27
4	106.746	19.189	106.624	19.572	342	75	46	Ng-Tr	2.3	8.3	0.67
5	106.648	17.927	106.695	18.759	3	70	62	Ng-Tr	2	8	0.66
.....
Vùng 2											
31	109.120	16.803	109.005	16.085	189	67	146	Ng-Ph	2	8	0.63
32	108.339	18.482	109.396	17.188	141	73	-121	Th-Ph	2	8	0.72
33	109.629	17.453	110.694	18.080	60	65	-132	Th-Ph	2.3	8.3	0.33
34	109.051	15.486	109.405	14.734	155	66	91	Ng	1.5	7.5	0.65
35	109.120	16.803	109.629	17.453	38	66	-156	Th-Ph	2.2	8.2	0.65
.....
Vùng 3											
63	119.213	16.329	119.237	17.740	1	49	64	Ng-Tr	5	11	0.82
64	118.034	21.462	118.611	21.912	52	66	177	Ph	3	9	0.31
65	119.999	22.544	119.934	22.999	352	70	1	Tr	2.5	8.5	0.23
66	117.371	20.101	117.683	20.549	35	66	169	Ph	3	9	0.18
67	115.769	19.765	116.881	19.777	89	65	171	Ph	3	9	0.37
.....
217	113.025	10.860	111.741	9.958	235	70	-43	Th-Tr	4.4	6.7	0.60

Ghi chú: Th: Trượt thuận, Ng: Trượt nghịch, Ph: Trượt phải, Tr: Trượt trái, Th-Ph: Thuận phải, Th-Tr: Thuận trái, Ng-Tr: Nghịch trái.

Trường ứng suất khu vực hiện đại. Trường ứng suất kiến tạo hiện đại khu vực được tính toán dựa trên phương vị ứng suất nén ép ngang cực đại của các cơ cấu chấn tiêu động đất; đồng thời kết hợp với phương chuyển động của phụ mảng Đông Nam Á. Ở phía tây khu vực nghiên cứu (vùng 1), phương nén ép ngang cực đại là Á Kinh tuyến, trong khi ở vùng 2 lại theo phương bắc tây bắc - nam đông nam; Phía đông (vùng 3) phương nén ép ngang cực đại lại theo phương Á Vĩ tuyến (hình 1).

Dựa trên sự khác nhau về phương nén ép ngang cực đại và dữ liệu cơ cấu chấn tiêu động đất, khu vực nghiên cứu được chia chi tiết làm 3 phân vùng (vùng 1, vùng 2 và vùng 3) để xác định các thông số trường ứng suất kiến tạo hiện đại. Trên cơ sở trường ứng suất đó xác định, đánh giá hành vi hoạt động của các đứt gãy trong từng phân vùng cụ thể (hình 1).

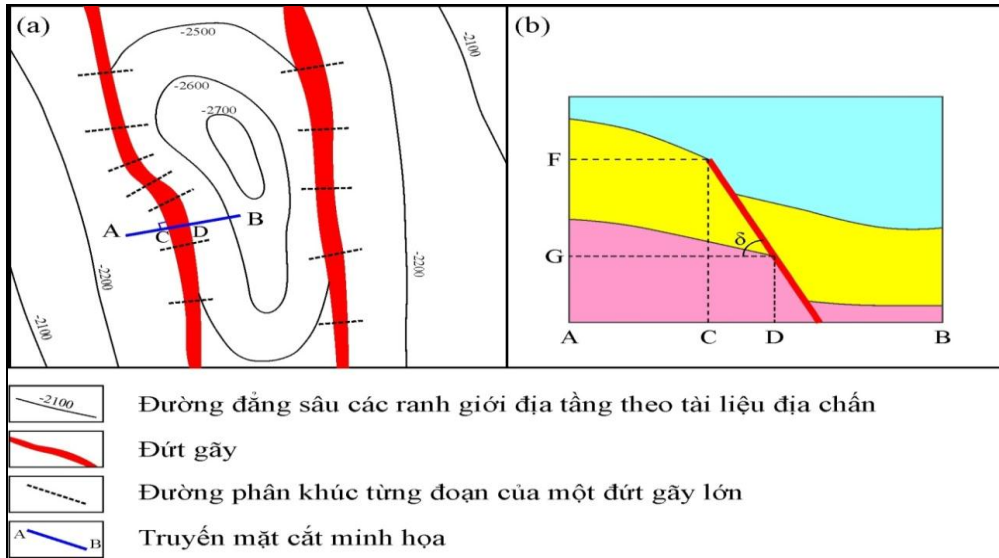
Hệ thống các đứt gãy trên hình 6 được phân chia thành 3 nhóm tương ứng với trường ứng suất của các phân vùng: Vùng 1, vùng 2 và

vùng 3 như trên hình 1. Trên hình 7 là minh họa về cách xác định các tham số của đoạn đứt gãy trong các vùng tương ứng. Mô hình gồm hai đứt gãy tạo thành một địa hào, với phương vị và góc dốc biến đổi theo không gian. Các đứt gãy được chia thành những đoạn nhỏ với tiêu chí: Trong một đoạn đứt gãy thì phương vị và góc dốc phải là gần như không thay đổi, sau đó xác định thông số cho từng đoạn đứt gãy.

Góc dốc δ của đứt gãy cũng được xác định theo công thức:

$$\delta = \arctan \frac{|FG|}{|CD|} \text{ thỏa mãn } 0 \leq \delta \leq 90^\circ$$

Giá trị xu thế trượt và vectơ trượt của các đoạn đứt gãy được xác định dựa trên trường ứng suất tại mỗi vùng. Trong vùng nghiên cứu, các tham số của 217 đoạn đứt gãy đều được tính toán, tuy nhiên, trong khuôn khổ bài báo, chỉ có một số kết quả minh họa được đưa ra trong bảng 2.



Hình 7. Minh họa cách xác định tham số các đoạn đứt gãy

Bảng 3. Kết quả giải bài toán ngược trường ứng suất (hình 1)

Vùng	Số CCCT	σ_1		σ_2		σ_3		ϕ	S_{Hmax}
		Phương vị	Góc cắm	Phương vị	Góc cắm	Phương vị	Góc cắm		
1	9	166	11	329	78	75	3	0.33	166
2	8	154	7	046	67	247	21	0.67	156
3	101	286	21	18	6	124	69	0.45	104

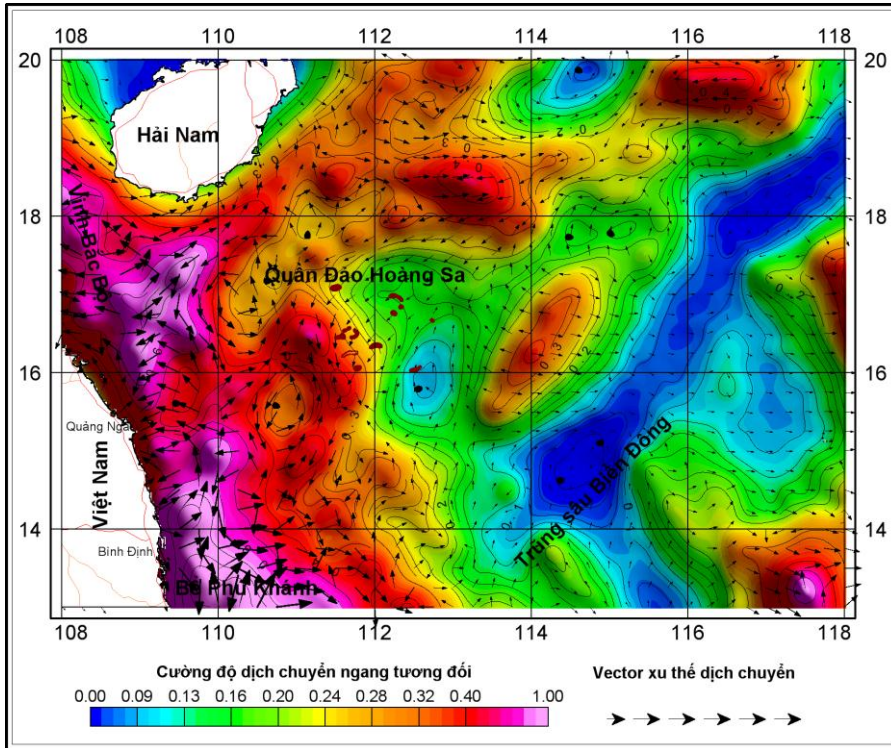
Xu hướng và độ lớn của trường dịch chuyển tương đối vỏ Trái đất. Mô hình trường dịch chuyển hiện đại vỏ Trái đất được xác định theo công thức (11). Các số liệu đầu vào của mô hình là các tham số đứt gãy trên bảng 2, chúng được xác định được bằng các phương pháp khác nhau như đã nêu ở trên. Qua kết quả của nhiều nghiên cứu trong giai đoạn trước [6, 20], có thể nói, phần lớn các đứt gãy trong khu vực có thể đã dừng hoạt động, nên trong mô hình này, biên độ trượt (net-slip) được thay thế bằng tham số xu hướng trượt (slip-tendency). Khả năng và mức độ dịch chuyển gây bởi các phân đoạn đứt gãy được xác định theo nguyên tắc so sánh tương đối giữa chúng với nhau. Độ sâu mô hình tính toán được lấy mặc định ở mức 10 km so với mặt nước biển.

Trên hình 8-9, độ lớn và hướng dịch chuyển tương đối của vỏ trái đất trong khu vực được biểu diễn qua phổ màu và độ lớn của vectơ. Mặc dù các biến dạng dịch chuyển xuất hiện trên toàn vùng nghiên cứu, nhưng tại các khu vực tồn tại hệ thống đứt gãy lớn thì biến

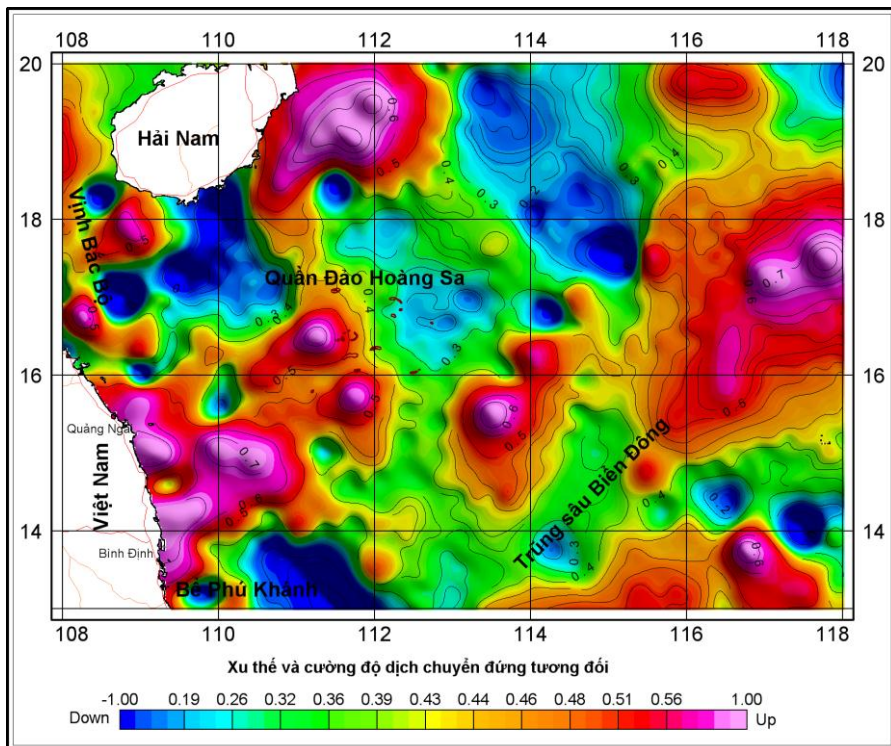
dạng dịch chuyển có cường độ lớn hơn. Nhìn vào đó, chúng ta có thể thấy được bức tranh phân bố mạnh yếu khác nhau trong từng khu vực cụ thể của trường dịch chuyển.

Trên hình 8, biến dạng dịch chuyển ngang phát triển mạnh dọc theo hệ các đứt gãy có qui mô lớn. Khu vực bắc bể Phú Khánh và tây quần đảo Hoàng Sa, biên độ dịch chuyển ngang lớn và hướng của vectơ chỉ ra xu thế hoạt động trượt bằng của hệ thống đứt gãy tại khu vực này. Điều đó cho thấy các hệ đứt gãy trong các khu vực này chịu ảnh hưởng mạnh mẽ của trường ứng suất hiện đại, chúng có khả năng tái hoạt động cao.

Một số biểu hiện biến dạng dịch chuyển ngang tương đối ở mức trung bình xuất hiện ở khu vực quần đảo Hoàng Sa. Tại các khu vực này, hướng của các vectơ dịch chuyển ngang đều cho thấy khả năng trượt bằng của các hệ thống các đứt gãy. Trên khu vực trung sâu Biển Đông, mức độ biến dạng dịch chuyển là thấp, cho thấy trường ứng suất kiến tạo hiện đại ít tác động đến hệ thống đứt gãy ở khu vực này (hình 8).



Hình 8. Biểu dạng dịch chuyển ngang vật chất vỏ Trái đất xác định theo các tham số đứt gãy



Hình 9. Biểu dạng dịch chuyển đứng vật chất vỏ Trái đất xác định theo các tham số đứt gãy

Trên hình 9 thể hiện biến dạng dịch chuyển thẳng đứng tương đối của vỏ Trái đất, thể hiện xu thế lên-xuống địa phương quanh các hệ thống đứt gãy. Các khu vực có xu hướng dịch chuyển lên trên, đó là phía bắc bể Phú Khánh, phía bắc và nam quần đảo Hoàng sa. Trong khi đó, khu vực như trung tâm bể Phú Khánh, tây và đông quần đảo Hoàng Sa, trường dịch chuyển đứng lại có xu thế xuống dưới.

Ở phía bắc của khu vực nghiên cứu-đội đứt gãy Littoral, trường biến dạng dịch chuyển có xu hướng xuống dưới, có cường độ nhỏ hơn nhiều so với xung quanh. Ở khu vực trung tâm quần đảo Hoàng Sa mức độ biến dạng dịch chuyển ở mức trung bình, ở đây cũng có sự đan xen giữa xu thế lên trên và xuống dưới.

Trung tâm khu vực nghiên cứu, các vùng trường biến dạng dịch chuyển hướng xuống dưới đan xen những vùng hướng lên trên chạy dọc theo các đứt gãy. Các vùng dịch chuyển hướng xuống dưới chủ yếu nằm giữa các khối nâng cấu trúc. Có thể thấy, ở phần phía tây của khu vực nghiên cứu (Bắc Phú Khánh), xu thế dịch chuyển hướng lên của vỏ Trái đất là khá mạnh. Điều này cho thấy mức độ hoạt động mạnh mẽ của hệ thống đứt gãy trong khu vực này (hình 9).

KẾT LUẬN

Trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và lân cận, trường ứng suất khu vực hiện đại được xác định thông qua các tham số cơ cấu chấn tiêu động đất ghi được trong hơn 100 năm qua. Các tham số hình học đứt gãy (như là vị trí, phương vị, góc dốc, hướng trượt và độ sâu) được xác định bằng các tài liệu trọng lực vệ tinh, địa chấn và trường ứng suất.

Xu thế và độ lớn của trường dịch chuyển tương đối vật chất vỏ Trái đất hiện đại được tính toán dựa trên mối quan hệ giữa trường ứng suất khu vực với các tham số hình học của đứt gãy. Trên cơ sở về xu thế và độ lớn đó, có thể xây dựng lại cơ chế kiến tạo địa động lực qua các thời kỳ địa chất khác nhau của khu vực quần đảo Hoàng Sa và lân cận.

Trường ứng suất khu vực hiện đại đóng một vai trò quan trọng trong các hoạt động dịch trượt của hệ thống đứt gãy. Trên thực tế các đứt gãy lớn có hệ số ma sát cao, tích lũy được nhiều năng lượng hơn dưới tác động của trường

ứng suất. Khi tích đủ năng lượng, chúng có thể tái hoạt động và phá vỡ cấu trúc địa chất khu vực. Mối quan hệ này có thể được xem như là một yếu tố then chốt trong nghiên cứu về nguy cơ tai biến địa chất trên biển.

Lời cảm ơn: Các tác giả cảm ơn đề tài VT-UD.03/17-20, đề tài VAST06.01/18-19 và ĐLTE00.09/18-19 đã hỗ trợ các điều kiện cần thiết để hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bott, M. H. P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, **96**(2), 109–117.
- [2] McKenzie, D. P., 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **59**(2), 591–601.
- [3] Angelier, J., 1990. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, **103**(2), 363–376.
- [4] Morris, A., Ferrill, D. A., and Henderson, D. B., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**(3), 275–278.
- [5] McFarland, J. M., Morris, A. P., and Ferrill, D. A., 2012. Stress inversion using slip tendency. *Computers & Geosciences*, **41**, 40–46.
- [6] Toda, S., Stein, R. S., Richards-Dinger, K., and Bozkurt, S. B., 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **110**(B5), B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- [7] Yukutake, Y., Takeda, T., and Yoshida, A., 2015. The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, **411**, 188–198.
- [8] Aid, K., and Richards, P. G., 1980. Quantitative seismology: Theory and methods. *San Francisco*.

- [9] Nguyễn Văn Vượng và nnk., 2004. Thử nghiệm phân vùng và dự báo các đặc trưng chuyên dịch hiện đại vỏ trái đất khu vực Tây Bắc Bộ trên cơ sở nghiên cứu mối tương tác giữa trường ứng suất khu vực với một số hệ thống đứt gãy. *Tạp chí Địa chất*, số 285//11–12/2004).
- [10] Trần Tuấn Dũng và nnk., 2015. Nghiên cứu, cảnh báo nguy cơ trượt lở ngầm trên thềm và sườn lục địa Nam Trung bộ. *Đề tài cấp nhà nước KC-09.11/2011–2015*.
- [11] <http://www.globalcmt.org/>
- [12] Bùi Công Quế và nnk., 2011. Nghiên cứu đánh giá độ nguy hiểm của động đất và sóng thần ở vùng ven biển và hải đảo Việt Nam và đề xuất các giải pháp phòng tránh, giảm nhẹ hậu quả. *Đề tài ĐTDL-2007G/45, 2009–2011*.
- [13] Nguyễn Trọng Tín và nnk., 2010. Nghiên cứu cấu trúc địa chất và đánh giá tiềm năng dầu khí các Khu vực Trường Sa và Tư Chính - Vũng Mây. *Đề tài KC.09-25/06 J-10, 2009–2010*.
- [14] Trần Tuấn Dũng, 2013. Đặc điểm cấu trúc kiến tạo khu vực nước sâu Biển Đông Việt Nam trên cơ sở minh giải tổng hợp các tài liệu trọng lực và từ. *Hội nghị 35 năm thành lập viện Dầu khí Việt Nam*, 6/2013, Tr. 55–66.
- [15] Sandwell, D., Garcia, E., Soofi, K., Wessel, P., Chandler, M., and Smith, W. H., 2013. Toward 1-mGal accuracy in global marine gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1. *The Leading Edge*, **32**(8), 892–899. DOI: 10.1190/tle32080892.1.
- [16] Dung, T. T., Que, B. C., and Phuong, N. H., 2013. Cenozoic basement structure of the South China Sea and adjacent areas by modeling and interpreting gravity data. *Russian Journal of Pacific Geology*, **7**(4), 227–236.
- [17] Dung, T. T., Que, B. C., and Minh, N. Q., 2016. Distribution of eruptive volcanic basalt in the South China Sea and adjacent areas by interpreting gravity, magnetic and seismic data. *Russian Journal of Pacific Geology*, **10**(1), 1–12. DOI 10.1134/S1819714016010024.
- [18] Blakely, R. J., and Simpson, R. W., 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, **51**(7), 1494–1498.
- [19] Delvaux, D., and Barth, A., 2010. African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data. *Tectonophysics*, **482**(1–4), 105–128.
- [20] Neves, M. C., Paiva, L. T., and Luis, J., 2009. Software for slip-tendency analysis in 3D: A plug-in for Coulomb. *Computers & Geosciences*, **35**(12), 2345–2352.
- [21] Steketee, J. A., 1958. On Volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium. *Canadian Journal of Physics*, **36**(2), 192–205.
- [22] Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**(2), 1018–1040.
- [23] Wallace, R. E., 1951. Geometry of shearing stress and relation to faulting. *The Journal of geology*, **59**(2), 118–130.
- [24] Kis, K. I., 1990. Transfer properties of the reduction of magnetic anomalies to the pole and to the equator. *Geophysics*, **55**(9), 1141–1147.
- [25] Schellart, W. P., 2000. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: Scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics*, **324**(1–2), 1–16.

PRESENT-DAY STRESS FIELD AND RELATIVE DISPLACEMENT
TENDENCY OF THE EARTH'S CRUST IN THE HOANG SA
ARCHIPELAGO AND ADJACENT AREA

**Tran Tuan Dung^{1,2}, R. G. Kulinich³, Ngo Thi Bich Tram⁴, Nguyen Quang Minh¹,
Nguyen Ba Dai¹, Tran Tuan Duong¹, Nguyen Thai Son⁵**

¹*Institute of Marine Geology and Geophysics, VAST, Vietnam*

²*Graduate University of Science and Technology, VAST, Vietnam*

³*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
of Russia Academy of Sciences, Russia*

⁴*Department of Cartography, General Staff of the Vietnam People's Army*

⁵*Institute of Geography, VAST, Vietnam*

Abstract. Present-day stress field in the Hoang Sa archipelago and adjacent areas is determined through the earthquake's focal mechanism parameters that have been recorded during a time period of more than 100 years. The geometric parameters of the faults (such as the location, strike and dip angles as well as depth, length...) are determined by satellite-derived gravity, seismic data and stress fields. In this study, predictive determination of the magnitude and tendency of the relative displacement of the Earth's crust is carried out by calculating and assessing the relationship between the stress fields and fault's geometric parameters. On the basis of the Earth's crust relative displacement, the geodynamic mechanism of the Hoang Sa archipelago and adjacent areas through the different geological periods can be rebuilt. Magnitude and tendency of the relative displacement of the Earth's crust are represented by the color spectrum and the vector's magnitude. Although the displacement appears in the whole region, its intensities are different in particular areas that have the faults systems with different grades.

Keywords: Hoang Sa archipelago, satellite-derived gravity, present-day stress field, earthquake's focal mechanism, Earth's crust displacement.