

Mô hình vận tốc sóng địa chấn (V_p , V_s , V_p/V_s) khu vực bậc thang thủy điện sông Đà

Cao Đình Trọng¹, Thái Anh Tuấn¹, Đinh Quốc Văn¹,
Cao Đình Triều^{2*}, Lê Văn Dũng¹, Nguyễn Đắc Cường¹

¹Viện Vật lý Địa cầu, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

²Viện Địa vật lý ứng dụng, Liên hiệp các Hội KH&KT Việt Nam

Ngày nhận bài 14/8/2017; ngày chuyển phản biện 18/8/2017; ngày nhận phản biện 25/9/2017; ngày chấp nhận đăng 29/9/2017

Tóm tắt:

Trong khuôn khổ bài báo này, các tác giả sử dụng phương pháp cắt lớp sóng địa chấn nông tính toán vận tốc sóng P (V_p), vận tốc sóng S (V_s) và tỷ số V_p/V_s khu vực bậc thang thủy điện sông Đà. Kết quả cho thấy:

- Vận tốc sóng P (V_p) và sóng S (V_s) tăng dần theo độ sâu: Từ $V_p = 5,3-5,9$ km/s và $V_s = 2,9-3,4$ km/s tại 2 km đến $V_p = 5,8-6,3$ km/s, $V_s = 3,4-3,9$ km/s tại 15 km. Trong khi đó, tỷ số vận tốc V_p/V_s biến động trong giới hạn từ 1,64 đến 1,74 và ít thay đổi theo độ sâu.

- Động đất kích thích vùng đập Sơn La xảy ra tại nơi có giá trị tỷ số $V_p/V_s = 1,67-1,69$, trong phạm vi nguồn Mường La - Bắc Yên và một đoạn nguồn sông Đà, nơi liên thông với hồ chứa.

- Ngày 20/8/2014 đã xảy ra trận động đất kích thích cấp độ mạnh 4,0 tại vùng đập Sơn La. Đây chưa phải là cấp độ mạnh lớn nhất vì theo dự báo thì nguy cơ động đất kích thích lớn nhất tại đây có thể đạt 5,0-5,1.

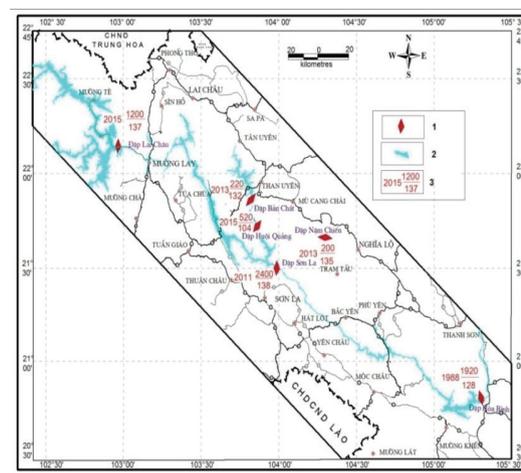
Từ khóa: Bậc thang thủy điện sông Đà, đập thủy điện Sơn La, động đất kích thích, tỷ số vận tốc V_p/V_s , vận tốc sóng P (V_p), vận tốc sóng S (V_s).

Chỉ số phân loại: 1.5

Mở đầu

Lưu vực sông Đà là nơi có biểu hiện hoạt động động đất mạnh nhất lãnh thổ Việt Nam [1]. Tính đến hết năm 2016 đã có 326 động đất cấp độ mạnh (M , magnitude) trên 3,0 ghi nhận được tại khu vực này, trong đó: Hai trận động đất cấp độ mạnh $M = 6,7-6,8$; 36 trận động đất trước năm 1976 có cấp độ mạnh lớn hơn 4,0 (chủ yếu theo tài liệu lịch sử và điều tra trong nhân dân); 288 trận động đất xảy ra từ năm 1976 đến 2015 (M lớn hơn 3,0). Đáng chú ý là trận động đất tại Tuần Giáo năm 1983 có $M = 6,7$ [1-3]. Trong khi đó, chỉ tính riêng trên dòng chính sông Đà và các nhánh chính đổ vào sông Đà đã có tới 6 nhà máy thủy điện thuộc vào loại lớn nhất Việt Nam đang hoạt động: Hòa Bình, Sơn La, Lai Châu, Nậm Chiến, Bản Chát và Huội Quảng (hình 1). Chính vì vậy, vấn đề nghiên cứu động đất và động đất kích thích phục vụ vận hành an toàn các nhà máy thủy điện tại khu vực này là cấp thiết và có ý nghĩa khoa học, nhân văn sâu sắc.

Nghiên cứu mô hình vận tốc sóng địa chấn trên cơ sở tài liệu động đất: Vận tốc sóng dọc (hay còn gọi là sóng P),



Hình 1. Các nhà máy thủy điện có công suất trên 200 MW khu vực bậc thang thủy điện sông Đà.

Chú giải: 1 - Đập thủy điện và ký hiệu tên đập: (1) Hòa Bình, (2) Sơn La, (3) Lai Châu, (4) Huội Quảng, (5) Bản Chát, (6) Nậm Chiến; 2 - Vùng hồ; 3 - Thông số nhà máy thủy điện: Số nguyên trước phân số (ví dụ: 2015) là năm tích nước lên cao trình tối đa, số nguyên trên gạch (ví dụ: 1200) là công suất hoạt động tối đa của nhà máy (MW), số nguyên dưới gạch ngang (ví dụ: 137) là chiều cao (m) đập thủy điện.

*Tác giả liên hệ: Email: cdtrieu@gmail.com

Seismic wave velocity models (V_p , V_s , and V_p/V_s) in the area of Da River ladder of hydroelectric dams

Dinh Trong Cao¹, Anh Tuan Thai¹, Quoc Van Dinh¹,
Dinh Trieu Cao², Van Dung Le¹, Duc Cuong Nguyen¹

¹Institute of Earth Physics, VAST

²Applied Geophysical Institute, VUSTA

Received 14 August 2017; accepted 29 September 2017

Abstract:

In this paper, the authors had used the seismic tomography method for determining the P-wave velocity (V_p), S-wave velocity (V_s), and the V_p/V_s ratio in the Da River ladder of hydroelectric dams. The study results have shown that:

- The V_p and V_s are increasing in compliance with the depth: from $V_p = 5.3-5.9$ km/s and $V_s = 2.9-3.4$ km/s at the depth of 2 km to $V_p = 5.8-6.3$ km/s and $V_s = 3.4-3.9$ km/s at the depth of 15 km. Meantime, the value of the V_p/V_s ratio changes in the range from 1.64 to 1.74 and remains unchanged with the depths.

- The triggered earthquakes in the Son La dam region occurred in the area where has the value of V_p/V_s ratio from 1.67 to 1.69, within the scope of the Muong La - Bac Yen seismic source and the part of Da River source, where have been connected with the reservoir.

- The triggered earthquake occurred at 20th August, 2014 in the Son La dam region had the magnitude of 4.0 (M4.0). This earthquake is not the largest one because it is forecasted that the maximum magnitude of triggered evident occurrence at this place can reach the value of 5.0-5.1.

Keywords: Da River ladder of hydroelectric dams, P-wave velocity (V_p), Son La dam, S-wave velocity (V_s), triggered earthquake, V_p/V_s ratio.

Classification number: 1.5

V_p ; vận tốc sóng ngang (hay còn gọi là sóng S), V_s và tỷ số V_p/V_s là cần thiết. Nó phản ánh đặc trưng cấu trúc vỏ trái đất, môi trường sinh chấn và nâng cao hiệu quả nghiên cứu dự báo động đất. Kết quả nghiên cứu mô hình vận tốc sóng P thạch quyển, manti Việt Nam và Đông Nam Á đã chứng minh được tính ưu việt trong nghiên cứu kiến tạo và địa động lực [4, 5]. Tại khu vực lòng hồ thủy điện sông Tranh 2, phương pháp cắt lớp sóng địa chấn nông (xác định giá trị V_p , V_s và V_p/V_s) đã được áp dụng và cho phép dự báo khu vực có nguy cơ xảy ra động đất kích thích [6].

Trong khuôn khổ bài báo này, các tác giả tiến hành:

1/ Xác định các giá trị V_p , V_s và tỷ số V_p/V_s toàn khu vực bậc thang thủy điện sông Đà;

2/ Chi tiết hóa mô hình vận tốc sóng địa chấn tại vùng đập thủy điện Sơn La nhằm dự báo khu vực có nguy cơ xảy ra động đất kích thích.

Đây là những kết quả mới nhất đạt được của đề tài “Nghiên cứu thiết lập mạng trạm quan trắc động đất và đánh giá động đất kích thích hồ chứa trên hệ thống bậc thang thủy điện sông Đà”, mã số: ĐTDLCN.27/15. Khu vực nghiên cứu được minh họa trong hình 1.

Cơ sở phương pháp luận của bài toán nghiên cứu mô hình sóng địa chấn dựa trên tài liệu động đất

Trong bài toán nghiên cứu mô hình sóng địa chấn (hay còn gọi là cắt lớp sóng địa chấn - seismic tomography), những thông số về thời gian truyền sóng địa chấn P, S từ các trận động đất ra môi trường xung quanh được sử dụng. Tại các trạm địa chấn, sau khi một trận động đất xảy ra, sau một khoảng thời gian thì trên các băng địa chấn của từng trạm sẽ xác định được thời điểm đầu tiên đến của các sóng địa chấn. Trong nghiên cứu cấu trúc, người ta quan tâm đến sóng khối (sóng dọc P, sóng ngang S) [4-9]. Hai loại sóng khối này truyền xuyên qua lòng đất, khúc xạ qua các môi trường vật chất khác nhau hoặc phản xạ tại các ranh giới của môi trường trước khi trở lại mặt đất. Sóng P có thể truyền qua tất cả các môi trường trong lòng đất tương tự như sóng âm, còn sóng S chỉ có thể truyền qua môi trường rắn. Vận tốc của sóng thay đổi theo tính chất của môi trường mà nó truyền qua, chủ yếu phụ thuộc vào mật độ của vật chất môi trường. Do đó, sự thay đổi phương hay vận tốc truyền sóng khối là dấu hiệu bất liên tục của mặt ranh giới.

Trong phương pháp cắt lớp sóng địa chấn, thông qua giá trị biến thiên của V_p , V_s và tỷ số V_p/V_s có thể nhận dạng được đặc trưng cấu trúc khu vực nghiên cứu. Quy trình tính toán mô hình sóng địa chấn trải qua 2 bước, từ đơn giản đến

phức tạp (từ 1D đến 3D) [1, 6, 8, 9]. Thông số đầu vào là tọa độ các trạm ghi địa chấn, thời gian đến của sóng P, sóng S và mô hình phân bố cấu trúc đơn giản của khu vực theo vận tốc truyền sóng. Quy trình tính toán được tính theo các vòng lặp (iteration), khi nào hàm tối ưu (GF) đạt ngưỡng giá trị sai số tối thiểu nào đó thì quy trình dừng lại. Trong quá trình tính toán, vị trí chấn tâm động đất của vùng nguồn cũng được chỉnh hóa theo giá trị của hàm tối ưu giữa thời gian truyền sóng thực tế và thời gian theo mô hình lý thuyết [6, 8, 9]. Trong phương pháp này, giá trị sai số RMS của hàm tối ưu, phương pháp tính tối ưu hóa LSQR, thuật toán bending và quy trình xoay góc được sử dụng [6, 8, 9].

Chuẩn hóa vị trí chấn tiêu động đất [8, 9]: Vị trí tối ưu của nguồn điểm được xác định bằng nhận định tại vị trí đó thời gian truyền sóng theo tính toán có giá trị sát nhất với thời gian thực tế đưa vào. Tại vòng lặp thứ N, giá trị thời gian dư được tính theo công thức:

$$dt_{ij}^N = dt_{ij}^{N-1} - \frac{\left\{ \sum_{j=1}^{M_i^{N-1}} A_{ps} dt_{ij}^{N-1} \right\}}{M_i^{N-1}} \quad (1)$$

Trong đó, M_i^{N-1} là số điểm tốt (tại các điểm này giá trị thời gian thỏa mãn điều kiện nhỏ hơn hoặc bằng giá trị dt^{max}); A_{ps} là giá trị trọng số, đánh giá giá trị số quan trọng trong bài toán của sóng P hoặc sóng S. Khi sử dụng giá trị sóng P để xác định vị trí nguồn thì kết quả bài toán chuẩn xác hơn so với sử dụng giá trị sóng S. Đi với sóng P, tham số có giá trị gấp đôi so với sóng S. Tại vòng lặp đầu tiên (N=1) $dt_{ij}^0 = t_{ij}^{obs} - t_{ij}^{ref}$; $M_i^0 = M_i$. Trong đó, t_{ij}^{obs} là thời gian thực quan sát được; t_{ij}^{ref} là thời gian truyền sóng tính toán theo nguồn i và trạm j . M_i là tổng số băng ghi sóng cho nguồn i .

Thuật toán tối ưu LSQR [8, 9]: Giá trị A và b cho trước, tìm giá trị $\min \|b - Ax\|$.

Đặt giá trị theo hệ (2), giá trị cần được xác định được chuyển hóa bằng vector y_k :

$$\begin{aligned} x_k &= V_k y_k, \\ r_k &= b - Ax_k, \\ t_{k+1} &= \beta_1 e_1 - B_k y_k, \end{aligned} \quad (2)$$

Khi đó, mật độ và giá trị cần tính được xác định bằng hệ phương trình $r_k = U_{k+1} t_{k+1}$. Với mục tiêu $\|r_k\|$ đạt giá trị nhỏ, và do hàm U_{k+1} bị giới hạn nên bài toán dẫn đến việc lựa chọn y_k để tối thiểu hóa giá trị $\|t_{k+1}\|$. Đến đây vẫn để

trở thành tìm giá trị thỏa mãn $\min \|\beta_1 e_1 - B_k y_k\|$, đây chính là nền tảng cơ bản của bài toán LSQR. Để tối ưu hóa quy trình tính toán, ta sử dụng giá trị cơ sở (factor QR) của B_k , có dạng:

$$Q_k [B_k \beta_1 e_1] = \begin{bmatrix} R_k & f_k \\ & \phi_{k+1} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \rho_1 & \theta_2 & & & & & \phi_1 \\ & \rho_2 & \theta_3 & & & & \phi_2 \\ & & & \ddots & & & \vdots \\ & & & & \rho_{k-1} & \theta_k & \phi_{k-1} \\ & & & & & & \phi_k \\ & & & & & & \phi_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

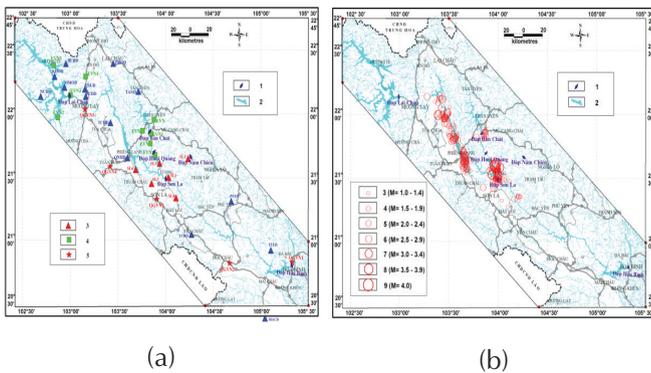
Trong đó, $Q_k \equiv Q_{k,k+1} \cdot Q_{2,3Q1,2}$ là kết quả của quy trình xoay (plane rotations) được thiết kế để loại trừ những tiết diện nhỏ (subdiagonals) β_2, β_3, \dots của β_k . Các vector y_k và t_{k+1} sau đó được tìm từ hệ phương trình (4) có dạng:

$$\begin{aligned} R_k y_k &= f_k \\ t_{k+1} &= Q_k^T \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_{k+1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Tuy nhiên, y_k sẽ không có thành phần nào giống với y_{k-1} . Đồng thời giá trị $[R_k f_k]$ sẽ giống với $[R_{k-1} f_{k-1}]$ chỉ bổ sung thêm dòng và cột mới. Để việc tính toán được đơn giản, ta sử dụng $x_k = V_k R_k^{-1} f_k \equiv D_k f_k$, với $D_k = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_k]$, thông số được tìm thấy dễ dàng từ hệ phương trình $R_k^T D_k^T = V_k^T$. Nếu $d_0 = x_0 = 0$, chúng ta có $d_k = \frac{1}{\rho_k} (v_k - \theta_k d_{k-1})$, $x_k = x_{k-1} + \phi_k d_k$ và chỉ có vòng lặp tốt nhất được giữ lại.

Thuật toán Bending [8, 9]: Tìm kiếm đường đi ngắn nhất cho sóng (thời gian truyền sóng là ngắn nhất). Thuật toán được sử dụng tối ưu với các mô hình cấu trúc địa chất, mật độ truyền sóng khác nhau. Sóng được ưu tiên qua các lớp cấu trúc thuận lợi cho việc truyền sóng để mang lại thời gian truyền là ngắn nhất. Biết điểm đầu và cuối của quá trình truyền sóng, chúng ta chia nhỏ các bước truyền sóng trung gian theo điểm chia (quy tắc phân chia đi từ trung tâm đường truyền sóng ra xung quanh) [6].

Quy trình góc xoay [8, 9]: Để chính xác hơn trong bài toán tomography, chúng ta tiến hành quy trình xoay góc trong bước tính toán giá trị truyền sóng theo từng đường truyền. Việc đầu tiên là xác định các điểm nút giao (node) hay các khối (block) có sóng đi qua. Do phương truyền sóng qua lại giữa các lớp không xác định được, chúng ta tiến hành quay các góc với độ quay khác nhau, và lấy trung bình giá trị thời gian [8, 9].



Hình 2. Sơ đồ mạng trạm địa chấn (a) và chấn tâm động đất (b) xảy ra từ năm 2010 khu vực bậc thang thủy điện sông Đà.

Chú giải: 1 - Đập thủy điện; 2 - Vùng hồ thủy điện; 3(a) - Trạm địa chấn của đề tài liên hồ sông Đà (tam giác màu đỏ là trạm quanh đập Sơn La, hoạt động từ năm 2009 đến nay); 4(a) - Trạm địa chấn của EVN (Viện Vật lý Địa cầu quản lý, hoạt động từ năm 2014); 5(a) - Trạm địa chấn quốc gia (hoạt động từ năm 1976); 3(b), 4(b), 5(b), 6(b), 7(b), 8(b), 9(b) - Chấn tâm động đất quan sát được từ năm 2010 (từ khi thủy điện Sơn La tích nước) và magnitude tương ứng. Các động đất trong lòng hồ Sơn La được [2, 7] khẳng định là động đất kích thích dựa vào hệ số b của hàm Gutenberg-Richter.

Các máy địa chấn chu kỳ ngắn loại L-4C3D (Mỹ) với bộ biến đổi tương tự số GEOSTRAS95 bắt đầu hoạt động từ 15/4/2009. Máy dải rộng loại CMG-40 T (Anh) với bộ ghi dữ liệu SAMTAC-801H (Nhật Bản) được bổ sung từ năm 2011. Với hệ thống mạng trạm quanh hồ Sơn La như trong hình 2(a) ta có thể ghi nhận được động đất từ $M < 1,0$ trở lên [2], và từ 2010 đến nay đã có trên 500 động đất được ghi nhận, trong đó có các động đất gần đập (bảng 1) được sử dụng trong nghiên cứu này.

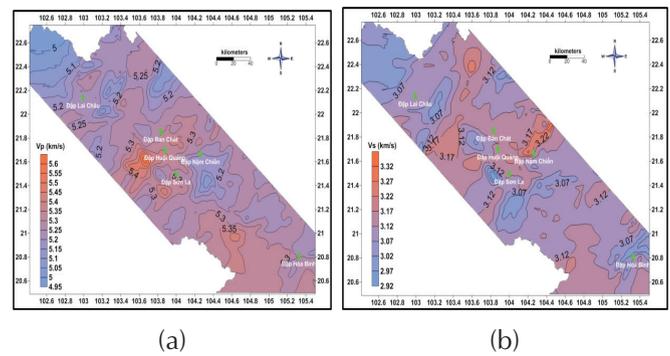
Mô hình V_p và V_s khu vực bậc thang thủy điện sông Đà

Mục đích của việc xây dựng mô hình vận tốc sóng địa chấn cho toàn khu vực bậc thang thủy điện sông Đà là tìm hiểu sơ bộ đặc điểm cấu trúc vỏ trái đất và nâng cao độ chính xác trong định vị tọa độ chấn tâm và chấn tiêu động đất. Chính vì vậy thông số V_p và V_s được chú trọng đặc biệt. Số liệu và quy trình tính như sau:

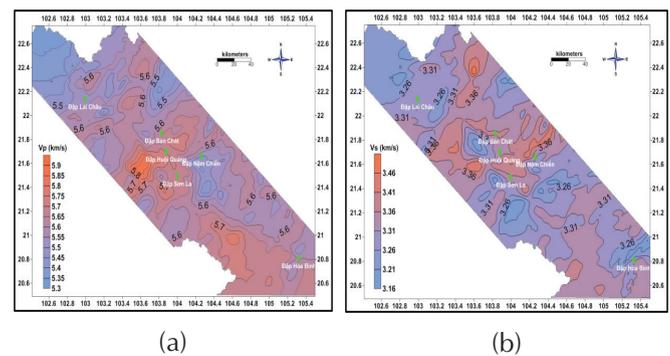
- Thời điểm đến sóng P và sóng S của 126 trận động đất có cấp độ mạnh lớn hơn 3,0 ghi nhận được tại các trạm địa chấn khu vực nghiên cứu được xác định.

- Sử dụng phần mềm LOTOS [9] trong thiết lập mô hình V_p , V_s và tỷ số V_p/V_s cho toàn khu vực nghiên cứu.

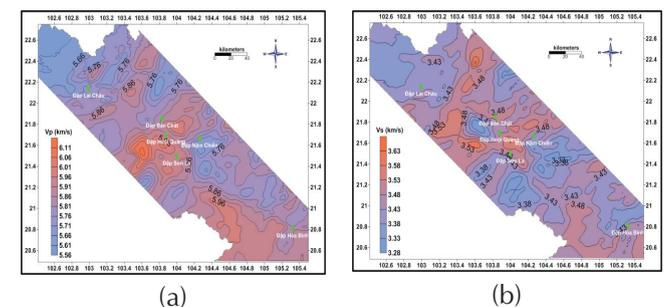
- Lưới chia trong tính toán V_p , V_s và V_p/V_s là 5×5 km. Mô hình vận tốc được xác định tại các độ sâu: 2 km, 5 km, 7,5 km, 10 km, 12,5 km, 15 km, 17,5 km và 20 km. Độ sâu nghiên cứu dừng ở mức 20 km vì cho rằng độ sâu chấn tiêu động đất khu vực bậc thang thủy điện sông Đà đạt tối đa không vượt quá 20 km [2, 7].



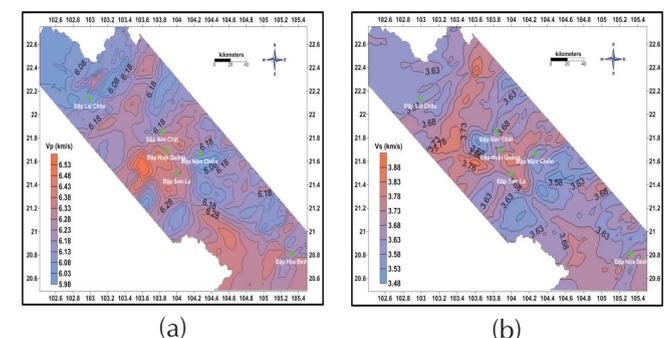
Hình 3. Giá trị V_p (a) và V_s (b) tại độ sâu 2 km khu vực bậc thang thủy điện sông Đà.



Hình 4. Giá trị V_p (a) và V_s (b) tại độ sâu 5 km khu vực bậc thang thủy điện sông Đà.



Hình 5. Giá trị V_p (a) và V_s (b) tại độ sâu 10 km khu vực bậc thang thủy điện sông Đà.



Hình 6. Giá trị V_p (a) và V_s (b) tại độ sâu 15 km khu vực bậc thang thủy điện sông Đà.

Kết quả nghiên cứu được trình bày ví dụ trong các hình từ hình 3 đến hình 6. Đây là các giá trị Vp và Vs tại các độ sâu 2 km (hình 3), 5 km (hình 4), 10 km (hình 5) và 15 km (hình 6). Phân bố vận tốc sóng địa chấn theo diện và theo độ sâu cho phép chúng ta hiểu biết về đặc điểm cấu trúc địa chất khu vực nghiên cứu. Hơn thế nữa, mô hình vận tốc này phục vụ trực tiếp cho nhiệm vụ định vị chấn tâm và chấn tiêu động đất được chính xác hơn [1, 6].

Trên cơ sở các kết quả xây dựng mô hình Vp, Vs và Vp/Vs đạt được trong nghiên cứu này cho phép rút ra một số nhận định sau:

1. Tổng thể cho ta thấy bức tranh vận tốc Vp và Vs thay đổi theo chiều hướng tăng dần cùng với độ sâu nghiên cứu. Vp biến đổi trong giới hạn từ 5,3-5,9 km/s tại độ sâu 2 km đến 5,8-6,3 km/s tại độ sâu 15 km. Tương ứng ta có Vs biến đổi trong giới hạn từ 2,9-3,4 km/s tại độ sâu 2 km đến 3,4-3,9 km/s tại độ sâu 15 km.

2. Nhìn chung, giá trị cực đại của Vp và Vs theo diện tại các độ sâu nhỏ hơn 5 km ($V_p > 5,8$; $V_s > 3,4$) là tương đối lớn. Đặc điểm này phản ánh sự tồn tại khá phổ biến của các thể địa chất xâm nhập dạng granit hoặc gabro trong phạm vi khu vực nghiên cứu.

3. Sự biến đổi Vp và Vs tương đối mạnh theo diện, hình thành các dị thường âm cấu trúc vận tốc theo diện, tại các độ sâu phản ánh tính chất phá hủy kiến tạo mạnh trong phạm vi khu vực bậc thang thủy điện sông Đà. Cấu trúc vận tốc Vp, Vs thấp tạo thành các dị thường dạng giải phản ánh đới dập vỡ kiến tạo mạnh. Các dị thường dương dạng đẳng thước phản ánh cấu trúc dạng khối vỏ trái đất [4-6].

Mô hình Vp, tỷ số Vp/Vs và biểu hiện hoạt động động đất kích thích vùng đập thủy điện Sơn La

Mô hình chi tiết Vp, Vs và Vp/Vs tại vùng đập thủy điện Sơn La được thiết lập trên cơ sở 107 động kích thích hồ Sơn La quan sát được từ năm 2010 (bảng 1) bằng các trạm địa chấn trong khu vực (hình 2). Đây là các động đất nhỏ, được ghi nhận đầy đủ thời điểm đến của sóng địa chấn (sóng P và sóng S) tại các trạm động đất gần. Phần mềm LOTOS [9] cũng được sử dụng trong tính toán với lưới chia 1x1 km và độ sâu thay đổi từ 1 km đến 10 km (cách nhau 1 km). Dừng ở độ sâu nghiên cứu tối đa 10 km vì động đất kích thích hồ chứa chủ yếu có độ sâu nhỏ hơn 10 km (bảng 1) [2, 6, 7]. Giá trị tỷ số Vp/Vs được chú trọng đặc biệt, nó phản ánh trực tiếp sự thay đổi môi trường của đới dập vỡ kiến tạo trước và sau khi thấm nước, là nguyên nhân gây nên động đất kích thích.

Bảng 1. Danh mục các trận động đất kích thích quan sát được từ năm 2010 tại vùng đập thủy điện Sơn La được sử dụng trong xác định mô hình Vp, Vs và Vp/Vs.

STT	Thời gian xảy ra động đất	Tọa độ chấn tâm		Độ sâu chấn tiêu	Cấp độ mạnh động đất (M)
		Vĩ độ	Kinh độ		
1	05/19/10	21,49	104,01	3,0	1,1
2	06/01/10	21,52	104,07	3,0	1,2
3	06/19/10	21,49	104,00	3,0	1,8
4	07/01/10	21,50	103,94	1,0	1,3
5	07/04/10	21,50	103,98	1,0	1,7
6	07/05/10	21,48	104,08	1,0	1,1
7	07/09/10	21,50	104,00	1,0	1,4
8	07/12/10	21,48	104,12	1,0	1,0
9	07/14/10	21,47	103,96	1,0	1,4
10	07/27/10	21,49	104,07	1,0	1,0
11	07/30/10	21,50	104,00	2,0	1,3
12	07/31/10	21,48	103,94	2,0	1,4
13	08/06/10	21,50	103,98	1,0	1,0
14	08/08/10	21,50	103,97	1,0	1,1
15	08/12/10	21,49	103,97	1,0	1,0
16	11/22/10	21,59	103,94	1,0	1,0
17	11/24/10	21,58	103,92	2,0	1,1
18	11/24/10	21,57	103,92	2,0	1,4
19	11/25/10	21,59	103,94	2,0	1,4
20	12/02/10	21,58	103,95	2,0	1,0
21	12/25/10	21,60	104,01	5,0	1,3
22	01/06/11	21,50	104,01	5,0	1,6
23	01/06/11	21,50	104,01	5,0	1,7
24	01/21/11	21,51	104,00	5,0	1,6
25	03/02/11	21,49	104,00	4,0	1,5
26	03/07/11	21,47	104,00	4,0	2,4
27	03/31/11	21,43	103,96	5,0	1,3
28	04/01/11	21,51	104,00	6,0	2,2
29	05/29/11	21,50	103,98	2,0	1,1
30	06/04/11	21,51	104,03	7,0	1,3
31	06/20/11	21,60	103,98	5,0	1,6
32	07/17/11	21,48	104,03	5,0	1,4
33	08/10/11	21,50	104,00	5,0	1,9
34	08/16/11	21,50	103,97	1,0	1,7
35	09/03/11	21,47	104,00	2,0	1,0
36	09/08/11	21,48	104,02	5,0	1,1
37	09/28/11	21,63	103,99	3,0	1,7
38	09/30/11	21,43	103,96	6,0	2,7
39	10/08/11	21,51	103,97	3,0	1,3
40	10/11/11	21,51	103,99	4,0	1,4
41	10/18/11	21,55	103,93	5,0	1,3
42	10/20/11	21,56	103,99	6,0	1,3
43	10/20/11	21,55	103,98	5,0	1,6
44	10/20/11	21,55	103,99	6,0	1,6
45	10/20/11	21,57	103,99	6,0	1,9
46	10/20/11	21,52	103,99	12,0	2,0
47	10/20/11	21,57	103,99	7,0	2,3
48	10/24/11	21,56	103,98	3,0	1,3
49	10/25/11	21,55	103,99	6,0	1,7
50	10/25/11	21,57	103,99	7,0	1,8
51	10/26/11	21,56	103,99	3,0	1,1

52	10/28/11	21,57	104,00	5,0	1,5
53	10/29/11	21,57	104,00	6,0	1,8
54	10/30/11	21,57	104,00	5,0	1,4
55	11/01/11	21,57	104,00	5,0	1,5
56	11/01/11	21,57	104,00	4,0	2,0
57	11/02/11	21,57	104,00	5,0	1,1
58	11/02/11	21,49	104,01	4,0	1,1
59	11/10/11	21,57	103,99	5,0	2,3
60	11/13/11	21,56	104,00	14,0	2,1
61	11/22/11	21,62	103,93	5,0	1,1
62	11/22/11	21,56	103,99	6,0	1,4
63	11/22/11	21,57	103,99	6,0	1,7
64	12/05/11	21,49	104,01	3,0	1,4
65	12/16/11	21,62	103,95	5,0	1,1
66	12/16/11	21,48	104,01	4,0	1,3
67	12/26/11	21,58	103,97	4,0	1,0
68	12/26/11	21,58	103,97	4,0	1,0
69	12/26/11	21,58	103,97	4,0	1,1
70	12/26/11	21,58	103,97	3,0	1,2
71	12/27/11	21,56	103,99	6,0	1,1
72	12/29/11	21,56	103,99	6,0	1,6
73	12/30/11	21,56	103,99	6,0	1,3
74	12/30/11	21,56	103,99	6,0	1,9
75	01/05/12	21,56	103,99	6,0	1,0
76	01/05/12	21,57	104,00	6,0	1,6
77	01/06/12	21,63	103,93	4,0	1,1
78	01/31/12	21,48	104,01	5,0	1,7
79	02/08/12	21,50	103,99	5,0	1,4
80	02/08/12	21,50	104,00	4,0	1,6
81	03/01/12	21,49	104,00	4,0	1,2
82	03/16/12	21,49	104,01	5,0	1,5
83	04/05/12	21,50	104,01	5,0	2,2
84	04/06/12	21,56	103,99	6,0	1,3
85	04/08/12	21,50	103,99	4,0	1,3
86	04/08/12	21,50	104,00	4,0	1,5
87	04/08/12	21,50	104,00	4,0	1,5
88	04/08/12	21,50	104,00	4,0	1,6
89	04/10/12	21,50	104,00	4,0	1,1
90	04/10/12	21,50	103,99	4,0	1,2
91	04/10/12	21,50	103,99	4,0	1,3
92	04/10/12	21,50	104,00	4,0	1,4
93	04/10/12	21,50	104,00	4,0	1,4
94	04/10/12	21,50	104,00	4,0	2,0
95	04/12/12	21,49	104,00	5,0	1,8
96	04/12/12	21,49	104,00	4,0	1,8
97	04/13/12	21,49	104,00	4,0	1,7
98	04/16/12	21,49	104,00	4,0	1,3
99	04/24/12	21,57	103,98	6,0	1,4
100	04/25/12	21,50	104,00	4,0	1,2
101	03/07/14	21,54	103,94	6,0	3,0
102	07/19/14	21,59	104,02	8,0	3,2
103	07/19/14	21,62	103,99	7,0	3,5
104	08/11/14	21,53	104,00	10,0	3,0
105	08/12/14	21,60	103,97	10,0	3,1
106	08/20/14	21,60	103,97	10,0	4,0
107	01/18/15	21,56	103,92	12,0	2,8

Mô hình vận tốc sóng địa chấn tại vùng đập thủy điện Sơn La theo tài liệu động đất kích thích được biểu diễn ví dụ tại các hình từ hình 7 đến hình 9. Ở đây, chỉ biểu diễn giá trị V_p và V_p/V_s vì khi biết được V_p và V_p/V_s thì ta có thể suy luận được V_s . Luận giải kết quả nghiên cứu đạt được cho thấy:

a. Về cơ bản, V_p vẫn tuân thủ theo quy luật tăng dần theo độ sâu (hình 7a, 8a và 9a). Tại độ sâu 1 km V_p biến đổi trong giới hạn từ 5,42-5,74 km/s. Trong khi đó, tại độ sâu 7 km giá trị V_p nằm trong khoảng 5,74-5,94 km/s. Cấu trúc dị thường vận tốc V_p cao, lớn hơn 5,6 km/s tại 3 km và lớn hơn 5,64 km/s tại độ sâu 7 km, trùng với khu vực tập trung chấn tiêu động đất kích thích. Đối đứt gãy Mường La - Bắc Yên trùng với dị thường cấu trúc dương của vận tốc sóng P, trong khi đới đứt gãy sông Đà lại nằm trọn trong hai cấu trúc dị thường vận tốc thấp của sóng P.

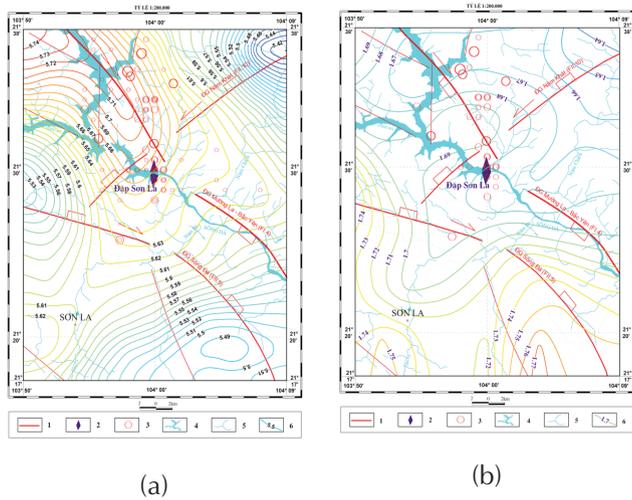
b. Tỷ số V_p/V_s vùng đập thủy điện Sơn La có giá trị biến động trong giới hạn từ 1,64 đến 1,74. Trong phạm vi độ sâu nghiên cứu, từ 1 km đến 10 km giá trị tỷ số này không thay đổi (hình 7b, 8b và 9b). Có nghĩa là V_p/V_s không có biểu hiện biến đổi theo độ sâu. Điều này chứng tỏ rằng hệ số tăng dần của V_p và V_s theo độ sâu là tương đồng.

c. Đối sánh phân bố tỷ số V_p/V_s với phân bố chấn tâm động đất kích thích vùng đập thủy điện Sơn La cho thấy (hình 7b, 8b và 9b):

- Động đất kích thích vùng đập Sơn La chủ yếu tập trung trong phạm vi đới đứt gãy Mường La - Bắc Yên, nơi có giá trị V_p/V_s biến động trong giới hạn 1,67-1,69.

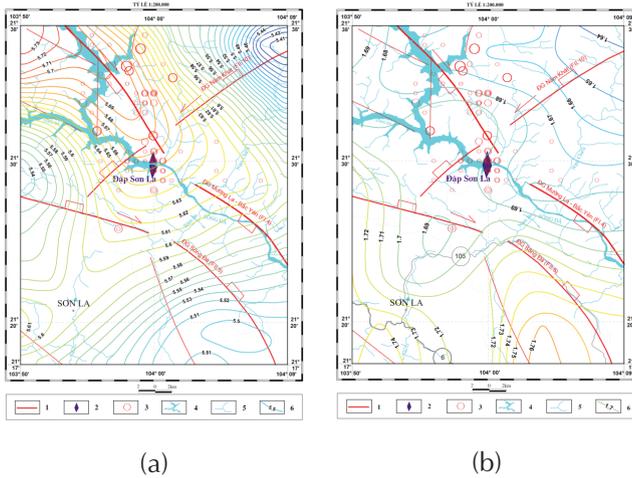
- Đới đứt gãy sông Đà trùng với cấu trúc tỷ số V_p/V_s có giá trị trung bình, biến đổi trong giới hạn 1,70-1,72. Tại cấu trúc này gần như không ghi nhận được bất kỳ động đất nào sau khi hồ thủy điện Sơn La tích nước (từ năm 2010).

d. Mục đích của nghiên cứu chi tiết mô hình vận tốc sóng địa chấn từ các trận động đất kích thích là nhằm tìm hiểu khả năng thâm thấu của nước hồ xuống đới dập vỡ kiến tạo. Quá trình thâm thấu này thường phụ thuộc vào độ cao mực nước [6]. Thâm thấu nước vào đới khe nứt dập vỡ làm thay đổi trạng thái ứng suất lỗ rỗng, tạo hiệu ứng xuất hiện động đất kích thích. Thông thường, đối với môi trường đồng nhất vật chất (nguyên khối) tỷ số V_p/V_s xấp xỉ 1,74. Đối cả nát, dập vỡ kiến tạo (nơi vật chất không còn nguyên khối, đồng nhất) giá trị V_p/V_s giảm, thường chỉ nằm trong giới hạn từ 1,70 đến 1,72 [6, 8, 9]. Thực tế nghiên cứu môi trường phát sinh động đất ở sông Tranh 2 cho thấy, động đất kích thích chỉ xuất hiện tại nơi ở đó có tỷ số V_p/V_s thấp, biến động trong giới hạn 1,63-1,67 [6], trùng với đới dập vỡ, ngậm nước của đá gneis phức hệ Khâm Đức - Núi Vú. Trong khi đó, động đất kích thích hồ Sơn La xuất hiện nơi có $V_p/V_s = 1,67-1,69$. Đáy hồ Sơn La được xác định tồn tại đá vôi hệ tầng Đồng Giao [7].

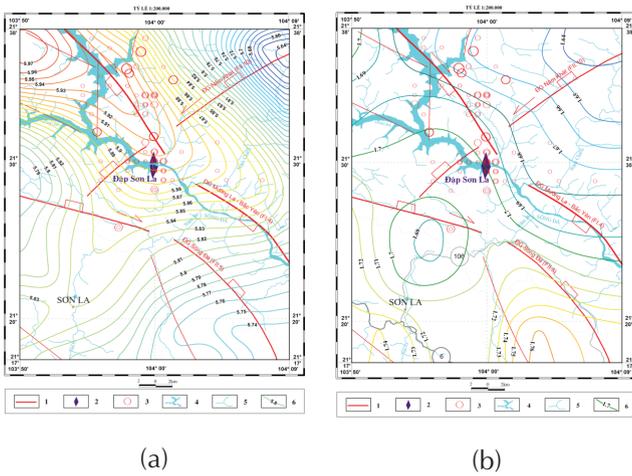


Hình 7. Giá trị V_p và V_p/V_s tại độ sâu 3 km.

Chú giải: 1 - Đứt gãy; 2 - Đập thủy điện; 3 - Vị trí chấn tâm động đất kích thích; 4 - Vùng hồ; 5 - Sông suối; 6: (a) Giá trị V_p , (b) Tỷ số V_p/V_s .



Hình 8: Giá trị V_p và V_p/V_s tại độ sâu 5 km.



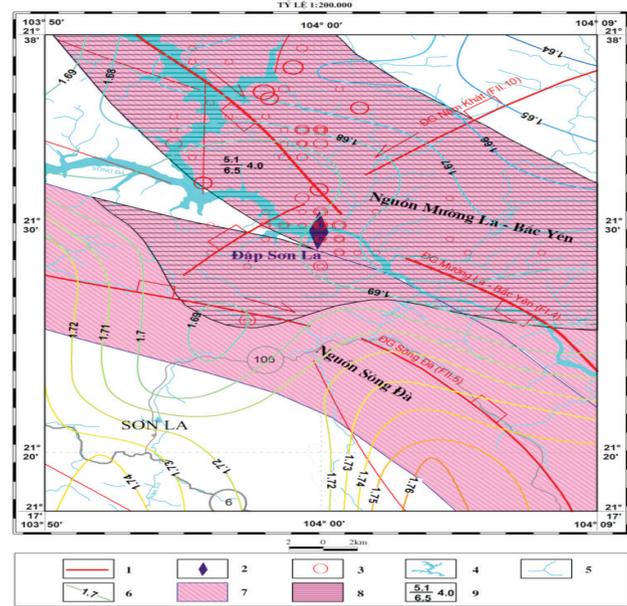
Hình 9. Giá trị V_p và V_p/V_s tại độ sâu 7 km.

e. Khu vực nghiên cứu chi tiết (vùng đập Sơn La) được xác định có 2 nguồn phát sinh động đất (hình 9), đó là [7]:

1- Nguồn Mường La - Bắc Yên: Được xác định có nguy cơ phát sinh động đất tự nhiên lớn nhất, $M_{max.tn} = 6,4-6,5$. Động đất kích thích nếu xảy ra được dự báo không vượt quá cấp độ mạnh 5,0-5,1 ($M_{max.kt} = 5,0-5,1$).

2- Nguồn sông Đà: Được xác định có nguy cơ phát sinh động đất tự nhiên lớn nhất, $M_{max.tn} = 6,5$. Động đất kích thích nếu xảy ra sẽ có cấp độ mạnh không vượt quá 5,7 ($M_{max.kt} = 5,7$).

Thảm thấu nước hồ xuống đới đập vỡ kiến tạo chỉ xảy ra đối với nguồn Mường La - Bắc Yên và một phần của nguồn sông Đà (hình 10). Động đất kích thích đã chỉ xảy ra trong phạm vi nguồn Mường La - Bắc Yên là chính, nơi đới đập vỡ kiến tạo liên thông với hồ, xuất hiện quá trình thảm thấu nước xuống sâu làm cho môi trường sinh chấn thay đổi theo chiều hướng kích hoạt động đất. Một phần rất nhỏ của đới đập vỡ sông Đà liên thông với hồ nên động đất kích thích cũng xuất hiện tại đây. Dựa vào phân bố tỷ số V_p/V_s các tác giả đã khoanh vùng được khu vực có nguy cơ xảy ra động đất kích thích vùng đập Sơn La (hình 10). Động đất kích thích cấp độ mạnh 4,0 đã xảy ra vào ngày 20/8/2014 tại khu vực được dự báo. Nếu kết quả dự báo trong [7] là chính xác thì đây chưa phải là động đất kích thích lớn nhất (lớn nhất được dự báo là có cấp độ mạnh 5,0-5,1).



Hình 10. Bản đồ dự báo vùng có nguy cơ xảy ra động đất kích thích.

Chú giải: 1 - Đứt gãy; 2 - Đập thủy điện; 3 - Vị trí chấn tâm động đất; 4 - Vùng hồ; 5 - Sông suối; 6 - Tỷ số V_p/V_s ; 7 - Vùng nguồn có nguy cơ xảy ra động đất tự nhiên; 8 - Vùng nguồn có nguy cơ xảy ra động đất kích thích; 9 - M_{max} động đất kích thích có khả năng xảy ra (5.1), M_{max} động đất tự nhiên có khả năng xảy ra (6.5), M động đất kích thích đã xảy ra (4.0).

Kết luận

Trên cơ sở các kết quả xác định vận tốc sóng P (V_p), vận tốc sóng S (V_s) và tỷ số V_p/V_s khu vực bậc thang thủy điện sông Đà cho phép rút ra một số nhận định sau:

1. V_p và V_s tăng dần theo độ sâu: Ở độ sâu 2 km, $V_p = 5,3-5,9$ km/s và $V_s = 2,9-3,4$ km/s; ở độ sâu 15 km, $V_p = 5,8-6,3$ km/s, $V_s = 3,4-3,9$ km/s. $V_p > 5,8$, $V_s > 3,4$ km/s phản ánh sự tồn tại các thể địa chất xâm nhập dạng granit hoặc gabro. V_p và V_s thấp tạo thành các dị thường dạng giải phản ánh đới dập vỡ kiến tạo mạnh.

2. Tỷ số V_p/V_s khu vực nghiên cứu biến động trong giới hạn từ 1,64 đến 1,74, ít thay đổi theo độ sâu. Động đất kích thích xảy ra tại nơi có giá trị tỷ số V_p/V_s biến động trong giới hạn 1,67-1,69 và có giá trị V_p cao. Đối với đới đứt gãy sông Đà, nơi có $V_p/V_s = 1,70-1,72$ không ghi nhận được động đất kích thích.

3. Tại khu vực vùng đập Sơn La tồn tại 2 nguồn phát sinh động đất tự nhiên: *Nguồn Mường La - Bắc Yên* có nguy cơ phát sinh động đất tự nhiên $M_{max}.tn = 6,4-6,5$; *Nguồn sông Đà* có $M_{max}.tn = 6,5$. Động đất kích thích đã xảy ra trong phạm vi nguồn Mường La - Bắc Yên và một đoạn nguồn sông Đà, nơi liên thông với hồ chứa.

4. Dựa vào phân bố tỷ số V_p/V_s có thể khoanh vùng được khu vực có nguy cơ xảy ra động đất kích thích vùng đập Sơn La. Động đất kích thích cấp độ mạnh 4,0 đã xảy ra vào ngày 20/8/2014 tại khu vực được dự báo. Đây chưa phải là cấp độ mạnh lớn nhất vì theo dự báo thì nguy cơ động đất kích thích lớn nhất tại đây có thể đạt 5,0-5,1.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cao Đình Triều (2010), *Seismic hazards in Vietnam*, Sci. and Techn. Publ. House, Hanoi, 182p.
- [2] Lê Tử Sơn và nnk (2012), *Nghiên cứu dự báo động đất kích thích vùng hồ thủy điện Sơn La*, Báo cáo tổng kết đề tài độc lập cấp nhà nước, mã số: ĐTDL.2009T/09, Viện Vật lý Địa cầu, 271tr.
- [3] Lê Văn Dũng, Cao Đình Triều, Cao Đình Trọng, Nguyễn Đắc Cường (2016), “Chế độ địa chấn khu vực bậc thang thủy điện sông Đà”, *Tạp chí Địa chất, loạt A*, **361-362(11-12)**, tr.38-51.
- [4] Cao Đình Triều, Lê Văn Dũng, Phạm Nam Hưng, Mai Xuân Bách, Thái Anh Tuấn (2010), “Mô hình sóng P và cấu trúc thạch quyển lãnh thổ Việt Nam và kế cận”, *Tuyển tập Hội nghị khoa học kỷ niệm 35 năm Viện KH&CN Việt Nam (1975-2010)*, tiểu ban Các khoa học về trái đất, tr.110-116.
- [5] Cao Đình Triều, T. Stvetkova, Bùi Anh Nam, Nguyễn Đức Vinh, Thái Anh Tuấn (2009), “Mô hình vận tốc sóng dọc thạch quyển và manti Đông Nam châu Á”, *Tạp chí Địa chất, loạt A*, **314(9-10)**, tr.1-8.
- [6] Cao Đình Trọng, Phạm Nam Hưng, Đinh Quốc Văn, Lê Quang Khôi (2014), “Mô hình cắt lớp sóng địa chấn khu vực thủy điện sông Tranh 2”, *Tạp chí Địa chất, loạt A*, **341-345(3-8/2014)**, tr.291-298.
- [7] Cao Đình Trọng, Nguyễn Ánh Dương, Thái Anh Tuấn, Cao Đình Triều (2016), “Đặc điểm hoạt động động đất kích thích khu vực bậc thang thủy điện sông Đà”, *Tạp chí Địa chất, loạt A*, **361-362 (11-12)**, tr.80-92.
- [8] Ivan Koulakov, Stephan V. Sobolev, Gunter Asch (2006), “P- and S-velocity images of the lithosphere-asthenosphere system in the Central Andes from local-source tomographic inversion”, *Geophys. J. Int.*, **167**, pp.106-126.
- [9] Ivan Koulakov (2009), “LOTOS Code for Local Earthquake Tomographic Inversion: Benchmarks for Testing Tomographic Algorithms”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99(1)**, pp.194-214.