

NGHIÊN CỨU VẬN TỐC TRUYỀN SÓNG TRONG MẪU ĐA TINH THỂ CỦA KHOÁNG VẬT NGÂM NƯỚC PHA A TRONG ĐIỀU KIỆN ÁP SUẤT CAO CỦA ĐỐI HÚT CHÌM

PHAN THIÊN HƯƠNG

E-mail: huongpt@hotmail.com

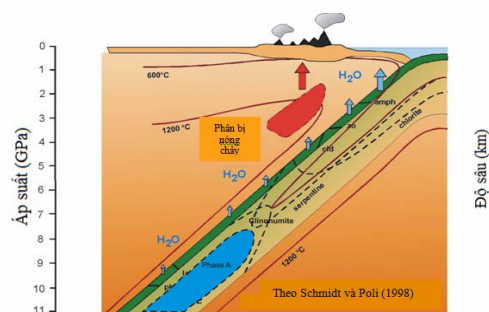
Trường Đại học Mỏ - Địa chất Hà Nội

Ngày nhận bài: 7 - 2 - 2012

1. Mở đầu

Trong đới hút chìm, nhiệt độ phần dưới luôn thấp hơn nhiệt độ mặt trên của đới [6, 18]. Vì vậy, theo quan điểm của một số nhà khoa học Stalder và cộng sự, (2001); Frost và n.n.k, (1999); Komabayashi và n.n.k (2005) [4, 11, 20], khi mảng đại dương bị hút chìm, tại độ sâu khoảng 200km sẽ xảy ra sự chuyển hóa của serpentin - khoáng vật phổ biến trong peridotit ngậm nước tại manti - thành các khoáng vật silicat giàu magie ngậm nước (DHMS - hydrous magnesium silicates), trong đó có khoáng vật pha A, một khoáng vật của nhóm humit. Phản ứng biểu diễn sự chuyển hóa là : $Atg = pha A + En + Fld$ (Atg- antigorit, pha A - pha A, En - enstatit, Fld- fluid- chất lỏng) [15, 19]. Sự phân bố các khoáng vật ngậm nước trong đới hút chìm được biểu diễn trong hình 1. Ở độ sâu khoảng 400 km, cùng với sự tăng áp suất và nhiệt độ, pha A sẽ biến đổi thành pha E [10, 14]. Sự tồn tại của pha A ở các độ sâu nói trên không chỉ cho thấy nước đã được mang xuống rất sâu, tới tận lớp manti mà còn có ý nghĩa quan trọng trong việc xác định tính chất đàn hồi của manti thạch quyển đại dương bị hút chìm (deeply subducted oceanic lithospheric mantle). Liên quan với ý nghĩa quan trọng trên, đã có nhiều công trình nghiên cứu sự tồn tại và tính chất đàn hồi của pha A được tiến hành như của Pawley (1995), Kudoh (2002) và Kuribayashi (2003) [12, 13, 16]. Tuy nhiên, kết quả thu được lại khá khác nhau. Ví dụ, bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (X-ray diffraction) của Pawley (1995) [16] tính được $K_{S0} = 145(5)$ GPa, $K's = 4$; trong khi đó,

bằng phương pháp nghiên cứu đơn tinh thể bằng tia X, Kudoh (2002) [12] và Kuribayashi (2003) [13] lại thu được $K_{S0} = 105(4)$, $K's = 3,9(8)$; Crichton và Ross (2002) [2] có $K_{S0} = 97,5$ GPa, $K's = 5,9$ và gần đây, Sanchez-Valle (2008) [17] bằng thực nghiệm Brioullain tính được $K_{S0} = 106(1)$ GPa, $K's = 5,8(3)$. Ngoài ra, sự tồn tại của pha ngậm nước cũng được dùng để giải thích sự xuất hiện của lớp dị thường âm (lớp vận tốc thấp) nằm ở độ sâu khoảng 150-250km trong đới hút chìm [6, 7]. Tuy nhiên, sự giải thích trên chưa có tính thuyết phục khi không biết giá trị vận tốc truyền sóng trong đới. Vì vậy, mục tiêu của công trình này là tạo ra các pha khoáng vật ngậm nước như pha A có thể tồn tại ở nhiệt độ và áp suất cao, sau đó dùng sản phẩm này làm mẫu để thực hiện các thí nghiệm đo vận tốc sóng nén (P) và sóng ngang (S) trong điều kiện tương tự ở đới hút chìm.

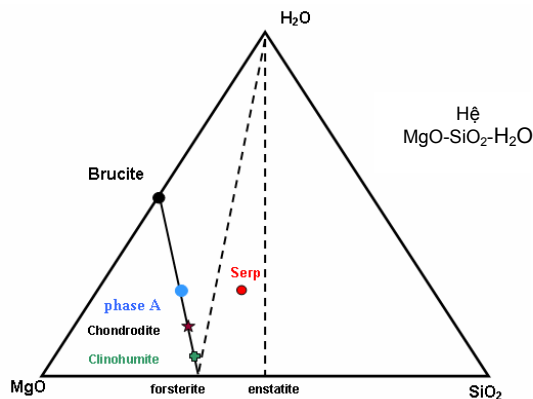


Hình 1. Sự phân bố nhiệt và các khoáng vật trong đới hút chìm lạnh (cold subduction zone) - Theo Schmidt và Poli (1998) [19]

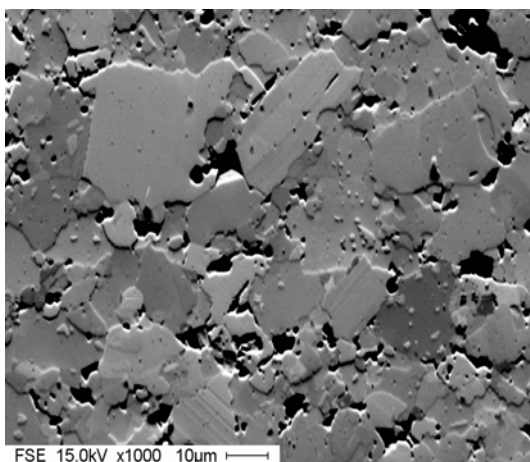
2. Mẫu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Chuẩn bị mẫu

Pha A là một khoáng vật thuộc nhóm humit, có công thức hóa học là $(Mg_7Si_2O_8(OH)_6)$ (hình 2). Mẫu đa tinh thể của pha A được tổng hợp bằng phương pháp Sol-gel và ép nóng đẳng hướng (hot isostatic pressing) [8]. Một loạt thí nghiệm được tiến hành với sự thay đổi tỷ lệ thành phần chất tham gia phản ứng MgO, SiO₂, H₂O; thời gian phản ứng; chu trình nhiệt độ và áp suất trong quá trình phản ứng; kiểm tra chất lượng mẫu bằng các phương pháp phân tích vi dò điện tử (hình 3); phổ Raman, nhiễu xạ tia X. Kết quả là tác giả đã thành công trong việc tạo mẫu pha A có kích thước hạt $7\pm 4\mu m$ với sự phân bố đồng đều, đẳng hướng. Mật độ đạt 99%. Việc tạo mẫu đạt chất lượng như trên là vô cùng quan trọng vì đó chính là yếu tố quyết định thành công của các thí nghiệm tiếp theo [9].



Hình 2: Đồ thị biểu diễn thành phần của pha A



Hình 3. Kiểm tra chất lượng mẫu bằng phương pháp phân tích vi dò điện tử (Microprobe FSE-forward scatter electron)

Để đo sóng địa chấn, mẫu của pha A được tạo dạng hình trụ, đường kính là 2mm, độ dài là $1,3 \div 2mm$. Hai mặt đáy được mài nhẵn bằng bột kim cương có độ hạt $0,5\mu m$.

2.2. Phương pháp đo sóng địa chấn

2.2.1. Lắp đặt mẫu

Cách bố trí mẫu trong phép đo tương tự như trong [9], theo đó bộ chuyển năng (transducer) biến năng lượng điện thành năng lượng dao động, tạo ra sóng P và S truyền qua khối đệm WC (để bảo đảm thí nghiệm được tiến hành trong môi trường áp suất cao) và corindon. Mẫu được đặt trong chì (Pb) và Teflon để bảo toàn mẫu trong môi trường áp suất cao và đẳng hướng. Bi dùng để kiểm soát được áp suất trong quá trình đo vận tốc.

2.2.2. Thu nổ sóng siêu âm

Với bộ chuyển năng LiNbO₃ (transducer) biến đổi điện năng sang cơ năng tạo dao động để phát sóng và ngược lại, chuyển từ năng lượng của sóng về năng lượng điện để ghi lại tín hiệu, ta có thể phát, thu được sóng dọc P và sóng ngang S truyền qua mẫu nghiên cứu. Trên máy thu - oscilloscope thể hiện rất rõ tín hiệu của sóng P và sóng S. Hình 4a biểu diễn thời gian phản xạ của sóng P trên màn hình oscilloscope, gồm 3 phản xạ giữa khối WC và corundum (P1), corundum và mẫu (P2), cuối cùng là đáy của mẫu (P3) (hình 4c). Xung sóng dưới dạng $\sin(x)/x$ với tần số cộng hưởng (resonance frequency) là 20 MHz đã được phát ra bởi bộ chuyển năng (hình 4b). Đo thời gian truyền sóng tại các áp suất khác nhau ta có thể tính được vận tốc truyền sóng P và sóng S ở các áp suất tương ứng bằng phương pháp hàm tương quan (hình 4d).

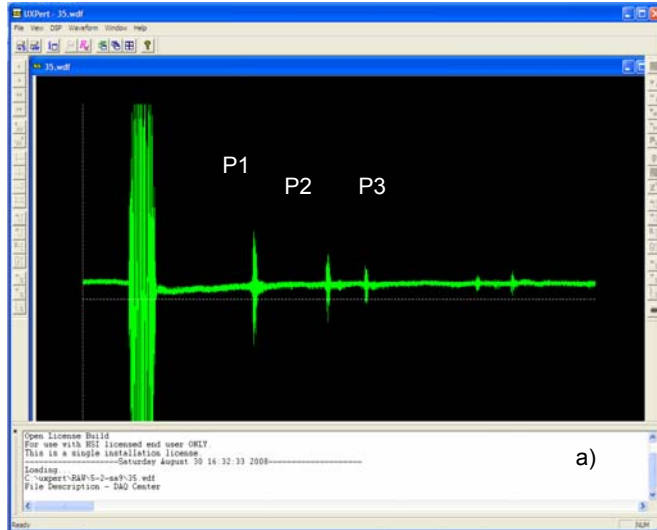
3. Kết quả nghiên cứu

Để có thể tính được vận tốc truyền sóng và các đặc tính đàn hồi của mẫu, trình tự nghiên cứu và các kết quả đạt được như sau:

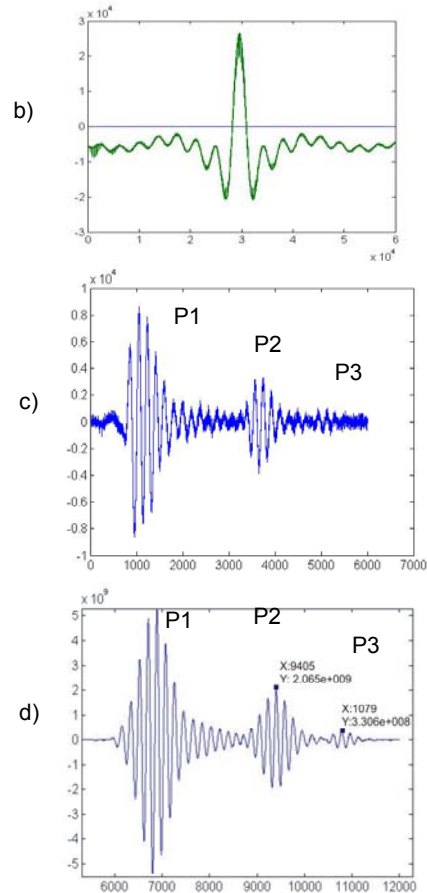
3.1. Thời gian truyền sóng

Bằng phương pháp tính hàm tương quan liên kết ta có thể tính chính xác thời gian đo sóng đến $10^{-2}\mu s$. Hình 4d biểu diễn hàm tương quan của sóng P. Khi chạy hàm tương quan liên kết, tại các điểm có phản xạ đường biểu diễn sẽ thể hiện rõ hơn giúp cho việc đo thời gian xảy ra phản xạ được chính xác hơn.

$$t_{P,S} = \frac{1}{2}(t_{P3,S3} - t_{P2,S2}) \quad (1)$$



Hình 4. Thu nỏ bằng transducer sau đó được ghi nhận
a) trên máy oscilloscope với b) xung sóng ban đầu;
c) số liệu thô thu được; d) hàm tự tương quan của số liệu



3.2. Tính chiều dài của mẫu

Khi áp suất tăng thì chiều dài của mẫu sẽ bị giảm đi do lực nén. Chiều dài của mẫu đã được tính theo các công thức của phương pháp Cook (1957) [1]:

$$\frac{l_0}{l} = 1 + \frac{1 + \Delta}{3h_0} \int_0^P \frac{dP}{\frac{1}{t_p^2} - \frac{4}{3t_s^2}} \quad (2)$$

$$h_0 = 4l_0^2 \rho_0 \quad (3)$$

Với l_0 - độ dài ban đầu của mẫu tại điều kiện nhiệt độ và áp suất của phòng; l - độ dài của mẫu tại điều kiện áp suất P và nhiệt độ của phòng; ρ_0 - khối lượng riêng của mẫu tại điều kiện nhiệt độ và áp suất của phòng; $\Delta \approx 0,01$ cho phần lớn các chất rắn đẳng hướng; t_p, t_s - thời gian truyền của sóng P và S qua mẫu với áp suất tương ứng P .

3.3. Tính các giá trị đàn hồi đặc trưng của mẫu (elastic properties)

Các tham số được dùng để tính các giá trị đàn hồi đặc trưng của mẫu hiển thị trên *bảng 1* bao gồm: P là áp suất (GPa); ρ khối lượng riêng của mẫu tại áp suất P ; ε sự biến dạng (strain) được xác định theo công thức (7); V_p, V_s vận tốc truyền sóng P và S của mẫu tương ứng với áp suất P ; V_0, V thể tích của mẫu tại điều kiện nhiệt độ, áp suất phòng và nhiệt độ phòng, áp suất P ; G, K - modul nén (bulk module) và trượt (shear module) của mẫu.

Các giá trị đàn hồi đặc trưng của mẫu được tính từ giá trị vận tốc đo được và dùng phương trình chuỗi hữu hạn Eulerian bậc 3 [3]:

$$\rho V_p^2 = (1 - 2\varepsilon)^{5/2} (L_1 + L_2 \varepsilon) \quad (4)$$

$$\rho V_s^2 = (1 - 2\varepsilon)^{5/2} (M_1 + M_2 \varepsilon) \quad (5)$$

$$P = -(1 - 2\varepsilon)^{5/2} (C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 / 2) \quad (6)$$

Bảng 1. Kết quả thực nghiệm đo thời gian p, ts và các giá trị khác khi áp suất thay đổi từ 0 đến 11 GPa

P(GPa)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	2tp(μs)	2ts(μs)	lo/li	li(mm)	V0/V	ε	Vp (km/s)	Vs(km/s)
0,68	2,94	0,354	0,591	1,003	1,303	1,008	-0,003	7,372	4,412
1,36	2,96	0,338	0,572	1,005	1,301	1,015	-0,005	7,705	4,549
2,03	2,98	0,323	0,550	1,007	1,298	1,020	-0,007	8,049	4,723
2,71	2,99	0,314	0,538	1,008	1,296	1,025	-0,008	8,267	4,821
3,39	3,01	0,310	0,538	1,010	1,294	1,030	-0,010	8,360	4,813
4,07	3,02	0,305	0,534	1,011	1,292	1,034	-0,011	8,485	4,842
4,75	3,03	0,300	0,529	1,013	1,291	1,038	-0,013	8,616	4,881
5,43	3,04	0,296	0,530	1,014	1,289	1,042	-0,014	8,723	4,867
6,10	3,06	0,294	0,517	1,016	1,287	1,048	-0,016	8,766	4,980
6,78	3,07	0,290	0,515	1,017	1,285	1,051	-0,017	8,878	4,994
7,46	3,07	0,285	0,514	1,017	1,285	1,053	-0,018	9,028	5,001
8,14	3,09	0,286	0,509	1,019	1,282	1,060	-0,020	8,978	5,040
8,82	3,10	0,282	0,509	1,020	1,281	1,061	-0,020	9,100	5,036
9,49	3,12	0,282	0,504	1,022	1,279	1,067	-0,022	9,083	5,077
10,17	3,13	0,282	0,510	1,023	1,277	1,071	-0,023	9,073	5,012
10,85	3,13	0,278	0,506	1,024	1,277	1,073	-0,024	9,198	5,048

Với ε đặc trưng cho sự biến dạng được tính như sau:

$$\varepsilon = [1 - (\rho_0/\rho)^{2/3}] / 2 = [1 - (V_0/V)^{2/3}] / 2 = [1 - (l_0/l)^2] / 2 \quad (7)$$

Hệ số L1, L2, M1 và M2 được dùng để tính module nén K_{S0} và module trượt G_0 tại áp suất phòng và đạo hàm của chúng K'_{S0} , G'_0 theo công thức sau:

$$M_1 = G_0 \quad (8)$$

$$M_2 = 5G_0 - 3K_{S0}G_0' \quad (9)$$

$$L_1 = K_{S0} + 4G_0/3 \quad (10)$$

$$L_2 = 5L_1 - 3K_{S0}(K_{S0}' + 4G_0'/3) \quad (11)$$

$$C1 = 3L_1 - 4M_1 \quad (12)$$

$$C_2 = 3L_2 - 4M_2 + 7C_1 \quad (13)$$

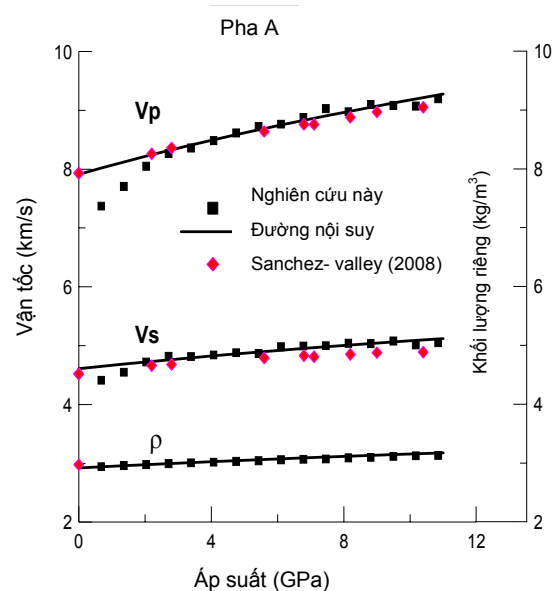
Để khẳng định tính xác thực của kết quả thực nghiệm, việc đo các giá trị được thực hiện trên một số mẫu. Kết quả các lần thu được là giống nhau với sai số $< 0,5\%$.

Kết quả đo thời gian và quãng đường sóng truyền được tính theo công thức (2) và (3), từ đó suy ra vận tốc sóng dọc V_p và sóng ngang V_s .

3.4. Phân tích kết quả

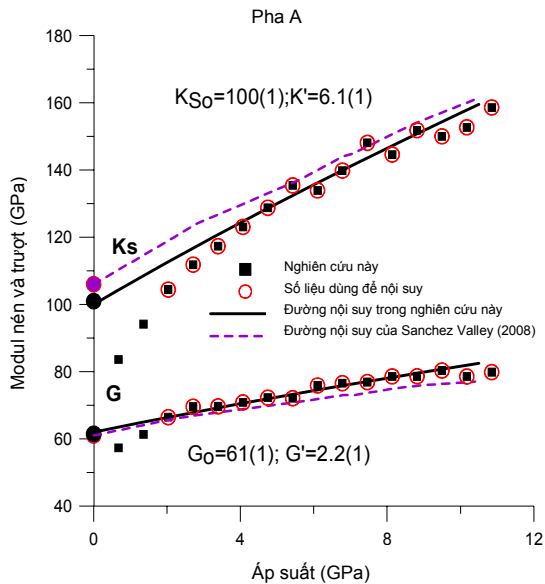
Các kết quả nghiên cứu bằng thực nghiệm bao gồm vận tốc truyền sóng và các đặc tính đàn hồi của khoáng vật pha A được thể hiện trong *bảng 1* và biểu diễn trên *hình 5*. Kết quả cho thấy có sự trùng lặp cao giữa các giá trị đo được trong nghiên cứu này theo phương pháp siêu âm với các giá trị

thu được của Sanchez - Valle (2008) [17] theo phương pháp Brillouin cho đơn tinh thể (single crystal). Trong nghiên cứu này chỉ dùng các giá trị thực nghiệm với áp suất lớn hơn 2 Gpa để xây dựng đường nội suy (fitting curve) vì trong điều kiện áp suất thấp hơn 2 Gpa, do các mặt tiếp xúc có không khí nằm xen, giá trị vận tốc đo được luôn thấp hơn giá trị thật. Đường nội suy sẽ cắt trục tung tại những giá trị tương ứng vận tốc sóng tại điều kiện nhiệt độ và áp suất thường (điều kiện phòng). Kết quả là $V_p = 7,9 \text{ km/s}$, $V_s = 4,5 \text{ km/s}$.



Hình 5. Sự phụ thuộc vận tốc V_p , V_s và khối lượng riêng vào áp suất. Đường liền nét màu đen là đường nội suy tính theo phương trình bậc 3 của chuỗi hữu hạn [3]

Hình 6 biểu diễn sự biến đổi của modul nén và trượt được tính trên cơ sở các giá trị V_p , V_s và sử dụng hàm chuỗi hữu hạn bậc 3 [3] theo áp suất. Kết quả thu được: $K_{So}=100(1)$, $K'=6,1(1)$, $G_o=61(1)$, and $G'_o=2,2(1)$.



Hình 6. Hàm phụ thuộc modul nén và modul trượt của pha A theo áp suất tới 11 GPa

4. Kết luận

Kết quả của bài báo này là minh chứng cho phương pháp tạo mẫu có chất lượng cao theo phương pháp sol-gel và dùng sóng siêu âm để đo vận tốc truyền sóng đàn hồi trong đối tượng quan tâm với điều kiện áp suất cao, làm tiền đề cho việc tính toán các đặc tính đàn hồi của các loại đá trong điều kiện nhiệt độ và áp suất cao tương ứng với điều kiện sâu trong lòng đất. Kết quả thu được trong nghiên cứu này là các giá trị và đạo hàm của modul khối và modul trượt: $K_{So}=100(1)$, $K'=6,1(1)$, $G_o=61(1)$, $G'_o=2,2(1)$ và $V_p=7,9\text{km/s}$, $V_s=4,5\text{km/s}$. Kết quả này tương đối phù hợp với các kết quả của Crichton và Ross (2002) [2], tuy nhiên nó khác biệt với kết quả của Pawley n.n.k (1995) [16] và có thể giải thích sự khác biệt này do việc nén không đồng hướng giữa các tinh thể pha A trong thí nghiệm của Pawley.

Các kết quả của pha A được trình bày tại đây cùng với các kết quả thí nghiệm tương tự cho một số mẫu khác như clinohumit, peridotit và eclogit sẽ làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình vận tốc cho

các kiểu tập hợp khoáng vật trong đới hút chìm và trong manti, từ đó đánh giá khả năng sử dụng tài liệu địa chấn tomography để tìm các đới dị thường chứa nước.

Lời cảm ơn: Nhân dịp này tác giả gửi lời cảm ơn chân thành tới GS.TS. Peter Ulmer, TS. Reusser Eric, PGS.TS. Sanchez-Valle đã giúp đỡ tận tình để công trình được hoàn thành.

TÀI LIỆU DẪN

[1] Cook, R. K., 1957: Variation of elastic constants and static strains with hydrostatic pressure: A method for calculation from ultrasonic measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 29: 445-449.

[2] Crichton, W. A. and Ross, N. L., 2002: Equation of state of dense hydrous magnesium silicate phase A, $\text{Mg}_7\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_6$. *American Mineralogist* 87(2-3): 333-338.

[3] Davies, G. F. and Dziewonski, A. M., 1975: Homogeneity and constitution of the Earth's lower mantle and outer core. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 10: 336-343.

[4] Frost, D. J., 1999: The stability of dense hydrous magnesium silicates in the Earth's transition zone and lower mantle. In: Fei, Y., Bertka, C.M., Mysen, B.O. (Eds.), *Mantle Petrology: Field observation and high-pressure experimentation*. *Geochemical Society Special Publication* 6: 283-296.

[5] Hacker, B. R., Abers, G. A., Peacock, S. M., 2003: Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H_2O contents. *Journal of Geophysical Research* 108: doi:10.1029/2001JB001127.

[6] Hacker, B. R., Peacock S. M., Abers, G. A., Holloway S. D., 2003: Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *Journal of Geophysical Research* 108: doi: 10.1029/2001JB001129.

[7] Hellfrich, G., 1996: Subducted lithospheric slab velocity structure: Observations and mineralogical inferences. In: Bebout, G.E., et al. (Eds.) *Subduction: Top to Bottom*. *Geophys. Monogr. Ser.* 96: 215-222.

[8] Phan H. T., Ulmer, P., Reusser, E., 2009: Fabrication of forsterite, clinohumite and phase A

polycrystalline aggregates for ultrasonic wave propagation measurements at high pressures. (in preparation, chapter 3 of this thesis).

[9] Phan Thiên Hương, 2011: Nghiên cứu quá trình tạo mẫu phục vụ quá trình đo sóng địa chấn trong các pha ngậm nước ở áp suất và nhiệt độ cao với mô hình đối hút chìm. TC Các Khoa học về Trái Đất, T.33, 2, tr.191-199.

[10] Komabayashi, T., Omori, S., Maruyama, S., 2004: Petrogenetic grid in the system MgO-SiO₂-H₂O up to 30 GPa, 1600°C: Applications to hydrous peridotite subducting into the Earth's deep interior. Journal of Geophysical Research 109: doi:10.1029/2003JB002651.

[11] Komabayashi, T., Omori, S., Maruyama, S., 2005: Experimental and theoretical study of stability of dense hydrous magnesium silicates in the deep upper mantle. Physics of the Earth and Planetary Interiors 153: 191-209.

[12] Kudoh, Y., Kuribayashi, T., Kagi, H., Sasaki, S., Tanaka, M., 2002: High-pressure structural study of phase-A, Mg₇Si₂H₆O₁₄ using synchrotron radiation. Journal of Physics: Condensed Matter 14: 10491-10495.

[13] Kuribayashi, T., Kudoh, Y., Kagi, H., 2003: Compressibility of phase A, Mg₇Si₂O₈(OH)₆ up to 11.2 GPa. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 98: 215-234.

[14] Melekhova, E., 2006: Rocking experiments on hydrous phases and high pressure fluid in the MgO-SiO₂-H₂O (MSH) system: Phase compositions, stabilities and thermodynamics. PhD thesis, ETH Zurich, 17010, 69p.

[15] Ohtani, E., Shibata, T., Kubo, T., Kato, T. 1995: Stability of hydrous phases in the transition zone and the uppermost part of the lower mantle. Geophysical Research Letters 22(19): 2553-2556.

[16] Pawley, A. R., Redfern, S. A. T., Wood, B. J., 1995: Thermal expansivities and compressibilities of hydrous phases in the system MgO-SiO₂-H₂O: talc, phase A and 10-Å phase." Contribution to Mineralogy and Petrology 122: 301-307.

[17] Sanchez-Valle, C., Sinogeikin, S. V., Smyth J.R., Bass J. D., 2008: Sound velocities and elasticity of DHMS phase A to high pressure and implication for seismic velocities and anisotropy in subducted slabs. Physics of the Earth and Planetary interiors: s0031-9201(08)00173-8 (in press, online available).

[18] Schmid, C., Goes S., Van der Lee, S., Giardini, D., 2002: Fate of the Cenozoic Farallon slab from a comparison of kinematic thermal modeling with tomographic images. Earth and Planetary Science Letters 204: 17-32.

[19] Schmidt, M. W. and Poli, S., 1998: Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. Earth and Planetary Science Letters 163: 361-379.

[20] Stalder, R. and Ulmer, P., 2001: Phase relations of a serpentine composition between 5 and 14 GPa: Significance of clinohumite and phase E as water carriers into the transition zone. Contributions to Mineralogy and Petrology 140: 670-679.

SUMMARY

Elastic wave velocity measurements of polycrystalline phase A (Mg₇Si₂O₈(OH)₆) at high pressures of subduction zone

Ultrasonic wave propagation velocities of polycrystalline aggregates of phase A (Mg₇Si₂O₈(OH)₆), a dense hydrous magnesium silicate (DHMS) phase, has been measured in the pressure range from 1 to 11 GPa at room temperature. The combination of sol-gel and hot isostatic pressing techniques were employed to produce high quality specimens. Measurements were carried out in a 6/8 multi-anvil device using an ultrasonic wave propagation technique. A sin(x)/x signal was propagated through the rock sample and reflections were collected to measure the travel times that, in turn, were used to determine the wave propagation velocities. From the measured velocities, the elastic properties of phase A have been obtained by applying a third order Eulerian finite-strain equation of state resulting in K_{so}=100(1) GPa, K'_s=6,3(1), G=61(1) GPa, and G'=2,2(1). Experiments are reproducible and confirm that we can measure elastic wave velocities of dense hydrous magnesium silicate minerals at pressures corresponding to the Earth's upper mantle approaching transition zone pressure conditions in a multi-anvil apparatus.