

ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ NGHỊCH ĐẢO TỚI KẾT QUẢ ĐO SÂU CỘNG HƯỞNG TỪ TRONG KHẢO SÁT NƯỚC KHE NÚT KARST TƯƠNG ĐỐI SÂU Ở NẬM LOÔNG, LAI CHÂU VỚI NHIỀU ĐIỆN TỪ LỚN

NGÔ VĂN BUƯ¹, TẶNG ĐÌNH NAM²

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Đông Ngạc, Từ Liêm, Hà Nội;

² Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, Km 9, Thanh Xuân, Hà Nội

Tóm tắt: Đo sâu cộng hưởng từ (ĐSCHT) được thực hiện ở Nậm Loông, tây bắc thị xã Lai Châu (cũ) nhằm khảo sát tầng chứa nước khe nứt karst hệ tầng Đông Giao (T_{2a} đg). Kết quả xử lý thống kê bộ số liệu đo cho thấy có hai vùng nước: nông, nghèo với độ sâu L₀ = (9,1 ± 0,9) m và hàm lượng nước w₀ = (0,8 ± 0,8) % và vùng nước sâu với L₁ = (24,0 ± 3) m và hàm lượng nước cực đại (20 ± 7)%. Như vậy, mặc dầu tỷ số tín hiệu trên nhiễu thấp (S/N = 2,3) và độ sâu tương đối của L₁ so với kích thước khung dây a = 37,5 m khá lớn (L₁/a = 0,64), song các độ sâu theo ĐSCHT khá phù hợp với kết quả khoan kiểm tra.

Trong quá trình xử lý số liệu phát hiện sai số hệ thống khi tính giá trị tần số Larmor f₀ bằng phần mềm ProDiviner, do giá trị tỷ số từ hồi chuyển trên 2π bị làm tròn quá mức tới 0,0426 Hz/nT.

I. MỞ ĐẦU

Cách xử lý số liệu và đánh giá kết quả nghịch đảo đo sâu cộng hưởng từ (ĐSCHT) dựa vào lỗ khoan kiểm tra trong khảo sát tầng chứa nước khe nứt karst hệ tầng Đông Giao (T_{2a} đg) ở Nậm Loông gần tây bắc (TB) thị xã Lai Châu (cũ) được trình bày trong bài báo này. Cơ sở của phương pháp được giới thiệu trong [9, 10, 15, 20, 21, 22, 35].

ĐSCHT dựa trên hiện tượng cộng hưởng từ (hạt nhân), dùng trường địa từ làm trường cảm ứng từ tĩnh B₀, nhằm khảo sát trực tiếp nước dưới đất do các nhà khoa học Nga đứng đầu là Semenov A.G. sáng chế từ giữa những năm 80 thế kỷ trước [26]. Dưới tác dụng của B₀ các proton của nguyên tử hydro trong phân tử nước quay đảo quanh phương của B₀ với tần số Larmor (f_L) theo biểu thức:

$$f_L \text{ (Hz)} = \frac{\gamma}{2\pi} B_0 \text{ (nT)} \quad (1)$$

trong đó γ là tỷ số từ hồi chuyển, có giá trị khác nhau đối với các hạt nhân khác nhau. ĐSCHT có ưu điểm cơ bản là tín hiệu đo được liên hệ trực tiếp với nước dưới đất có thể khai thác được và tỷ lệ thuận với khối lượng nước [10]. Trên mặt đất tại điểm đo, dây điện được trải trên mặt đất thường theo khung hình vuông, cạnh a được gọi là khung dây và xung dòng điện xoay chiều cường độ i₀ (A), tần số f₀ (i(t) = i₀cos(2πf₀t), 0 ≤ t ≤ τ) đúng bằng tần số Larmor (f_L) đã được đo ngay trước khi ĐSCHT để tạo ra sự cộng hưởng trong một thời gian ngắn τ (thường là 40 ms). Đại lượng q (q = i₀τ (A.ms)) được gọi là momen xung, ở đây gọi tắt là xung. Trong ĐSCHT q đóng vai trò tương tự như cự ly AB giữa 2 cực phát trong đo sâu điện thẳng đứng với dòng một chiều. Tại mỗi

điểm đo sâu phải dùng một số xung q , thường là 16. Độ sâu khảo sát phụ thuộc nhiều vào a , giá trị cực đại của xung, điện trở suất của môi trường, nhiễu điện từ và không quá 150 m. Sau khi ngắt xung dòng điện, các proton dao động với tần số f_0 hồi phục trở lại trạng thái ban đầu, tạo ra trường từ hồi phục; điện áp (tín hiệu) của nó đo được với tần số f_R cũng bằng khung dây nói trên. Nhưng nếu trong quá trình đo, trường địa từ B_0 thay đổi (biến thiên ngày đêm) hoặc do bất đồng nhất về từ tính của môi trường đất đá thì f_R khác với tần số f_0 của dòng xoay chiều đã phát vào khung dây, tạo ra dịch chuyển tần số (δf): $\delta f = f_R - f_0$. Với công nghệ hiện nay không thể hiệu chỉnh cho δf [3, 7], do vậy nếu $|\delta f| > 1$ Hz ngay từ những q đầu tiên thì cần thay giá trị f_0 bằng f_R đã thu được ở xung có tỷ số tín hiệu trên nhiễu tốt nhất để đo lại [24]. Điện áp suy giảm với thời gian theo quy luật hàm mũ với hằng số thời gian T_2^* . Điện áp đo được ngay sau ngắt xung càng lớn khi proton càng nhiều. Chúng có trong phân tử nước, dầu khí và trong phân tử ở thể rắn, được phân biệt dựa vào đặc điểm hồi phục khác nhau, hằng số thời gian suy giảm khác nhau do mức độ linh động khác nhau. Hạt nhân trong phân tử chất rắn có mức độ linh động rất hạn chế và suy giảm rất nhanh (T_2^* quá nhỏ). Trong đất đá lỗ hổng như cát kết, trầm tích vỡ vụn giàu thạch anh, các hạt nhân trong phân tử chất lỏng liên kết với bề mặt chất rắn (nước liên kết) hoặc ở hổng nhỏ khi dao động luôn va chạm với bề mặt chất rắn, tiêu hao năng lượng nên năng lượng suy giảm nhanh (T_2^* nhỏ), hạt nhân ở trong hổng lớn hơn (nước tự do) có T_2^* lớn hơn [27]. Máy đo có thời gian chết (máy chưa đo được) 30-40 ms, nên chỉ đo được tín hiệu của nước tự do với $T_2^* > 30$ ms. Môi trường 2D/3D như hang động karst, dòng sông ngầm có kích thước nhỏ hơn kích thước khung dây mà dùng phần mềm 1D thì mắc sai lầm lớn [7], nếu chỉ là đá vôi đập vỡ, nứt nẻ, karst hóa trong độ sâu khảo sát của ĐSCHT như ở đây với điện trở suất cao thì vẫn có thể khai thác SAMOVAR 1D [2]. Trong việc này thuật toán điều chỉnh hoá của Tikhonov làm trơn ranh giới và kết quả nghịch đảo phụ thuộc nhiều vào tỷ số tín hiệu trên nhiễu [14], hệ số điều chỉnh R [34], số lượng cũng như chiều dày lớp chứa nước trong mô hình hoá. Các giá trị biên độ (trong SAMOVAR chỉ dùng biên độ, không dùng pha) và T_2^* đo và tính ra, được đưa vào nghịch đảo để cho các giá trị hàm lượng nước w và T_2^* phân bố theo chiều sâu, trong đó T_2^* có độ chính xác thấp nhất [8]. Hàm lượng nước w ($0 \leq w \leq 1$) là tỷ số giữa thể tích nước tự do có thể khai thác được so với thể tích của vật thể, biểu thị bằng số thập phân hoặc bằng phần trăm (%); w ít chịu ảnh hưởng của δf . Mô hình hoá bằng số trong dải S/N = 40-2 cho thấy khi S/N > 4 và $|\delta f| < 0,5$ là những điều kiện thích hợp cho việc xử lý số liệu tin cậy và khi $|\delta f| > 0,5$ thì có thể nghịch đảo tin cậy cho biên độ [8]. Khảo sát ảnh hưởng của δf ở 1, 2 và 3 Hz tới kết quả nghịch đảo cho trường hợp lớp nước với $w = 30\%$ ở độ sâu từ 25 đến 50 m và 5% trong môi trường vây quanh, dưới khung dây tròn đường kính 100 m trong môi trường điện trở suất cao, thấy riêng độ sâu đỉnh lớp nước vẫn giữ nguyên, còn khi δf tăng thì độ sâu đáy lớp nước và hàm lượng nước bên dưới lớp nước tăng, trong khi đó hàm lượng nước của lớp nước giảm [1]. Mặc dầu bài toán nghịch vốn đa trị, song kết quả nghịch đảo cho thấy độ sâu đỉnh lớp nước khá ổn định với sai số tương đối của đỉnh nước dưới đất nhỏ hơn 25 % trong mô hình hoá toán học (không nhiễu) [11] và trong thực tế phù hợp với kết quả đo mực nước tĩnh trong lỗ khoan đá cứng khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) lớn với đỉnh nước rất nông L ($L/a < 0,15$) [32] hoặc nông ($L/a < 0,38$) [12].

Vấn đề được đặt ra ở đây là với chất lượng số liệu xấu: S/N nhỏ, tần số Larmor xấp xỉ với bội của dòng điện công nghiệp, hầu hết các xung đều có $\delta f > 1$ Hz, yêu cầu phải khảo sát đỉnh nước sâu ($L/a > 0,5$) thì các kết quả nghịch đảo còn chấp nhận được không? Để làm việc đó, không đơn

thuần chỉ trình bày kết quả dưới dạng đồ thị cho một trường hợp nghịch đảo như thường thấy, mà cần khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố nêu trên, từ đó lấy các kết quả hợp lý, mang tính đại diện để xử lý thống kê. Hiện chưa có quy định thống nhất về cách xác định ranh giới trong dùng thuật toán làm tròn [16, 33] nên ở đây nêu ra một quy ước thống nhất trong quá trình khảo sát. Trong quá trình chuẩn bị số liệu cũng phát hiện sai số hệ thống trong tính tần số Larmor của phần mềm ProDiviner. Bài báo gồm 3 phần: chất lượng số liệu điem đo d5 xấu, ảnh hưởng của các tham số xử lý số liệu tới kết quả nghịch đảo và đánh giá kết quả xử lý số liệu thống kê.

II. CHẤT LƯỢNG SỐ LIỆU ĐO D5 XẤU DO NHIỀU ĐIỆN TỬ LỚN VÀ SAI SỐ HỆ THỐNG KHI TÍNH TẦN SỐ LARMOR VỚI PRODIVINER

Trong khu vực thị xã Lai Châu có tầng chứa nước khe nứt – karst hệ tầng Đồng Giao (T_{2adg}), trong đó cánh đồng karst nằm trên nếp lồi thuộc xã Nậm Loỏng (phía TB thị xã) là một trong những nơi có tiềm năng chứa nước. Tại thung lũng Nậm Loỏng đã ĐSCHT trên 2 tuyến cách nhau 50 m với phương vị 30^0 , cắt ngang thung lũng, ở bốn vị trí với 16 xung; ba trên tuyến t1b cách nhau 50 m ở cọc 5, 0, -5 và một trên tuyến t1 tại cọc 0. Cọc 0 tuyến t1 (ký hiệu 0t1) ở TB của 0t1b. Do nhiễu điện từ rất lớn nên phải dùng khung dây (hình) số tám vuông [30] với phương vị 325^0 . Tại cọc 0t1 đo với khung dây cạnh $a = 75$ m và $a = 37,5$ m. So sánh kết quả nghịch đảo sơ bộ của 2 khung dây thấy phần nước kéo xuống rất sâu với T_2^* cứ tăng mãi do ảnh hưởng đuôi (tail effect) của khung dây số tám, nên sau đó dùng kích thước $a = 37,5$ m cuộn thành 2 vòng, tín hiệu tăng gấp khoảng 2 lần và độ phân giải theo phương nằm ngang tăng lên, nhằm khảo sát phần nông tối đa 40 m.

Tại cọc 0t1, trước khi bắt đầu đo với $a = 75$ m, dùng từ kế proton đo B_0 được giá trị 45812,2 nT; phần mềm ProDiviner tính tần số Larmor theo (1) và hiển thị đại lượng trên ProDiviner nên được ký hiệu là f_{PD} với giá trị 1951,6 Hz.

Theo kết quả đo tần số ở các xung trong bảng 1, trừ $q_i = 15$ và các q_i có $|\delta f| > 2$ ở $i = 2, 3$ và 9, thấy trung bình giá trị tần số của tín hiệu đo được $f_R \approx 1950,1$ nhỏ hơn nhiều so với tần số Larmor tính được và hiển thị trên ProDiviner (f_{PD}) và tạo ra δf lớn, trung bình $(1950,1 - 1951,6 \approx) - 1,5$ Hz. Chuyên gia G. Lange cùng đo tại thực địa khuyên khi đến một vùng mới, đo B_0 để có f_{PD} , sau đó căn cứ vào f_R thực tế đo được, dùng cho các điem đo tiếp theo trong vùng mà không đo B_0 ở các điem đó nữa, như trong [24]. Ngay sau đó chuyên gia về nước và các điem đo sau đều lấy $f_0 = 1950,1$ Hz. Sau này kiểm tra lại, thấy trường hợp $f_{PD} > f_R$ cũng gặp ở các địa điem đã đo trước đó ở Việt Nam cũng thấy ở nước ngoài khi dùng ProDiviner để tính f_0 như trong [31] nên nghĩ đến

sai số hệ thống. Từ đó tìm đến giá trị của hằng số vật lý cơ bản theo CODATA 2006: $\frac{\gamma}{2\pi} = (0,0425774821 \pm 0,0000000011)$ Hz/nT [4] và theo (1) có $f_0 = 1950,6$ Hz. Như vậy phần mềm

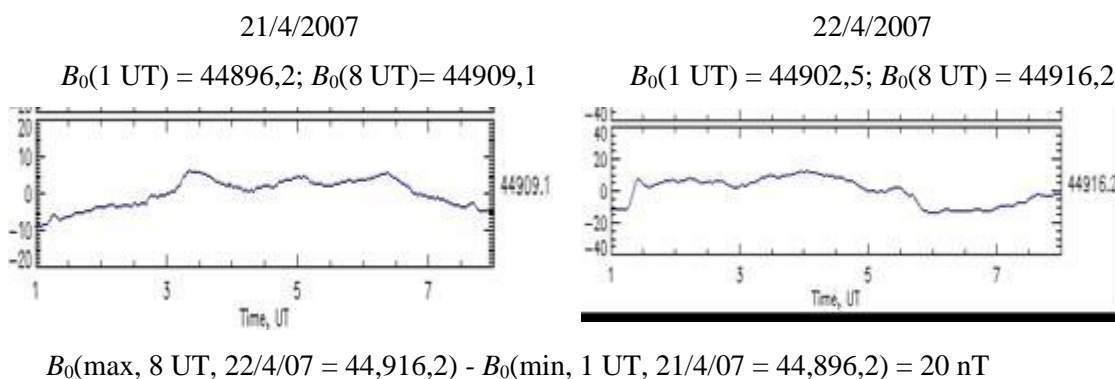
ProDiviner tính tần số Larmor (f_0) cũng theo (1) nhưng với hằng số bị làm tròn quá mức $\frac{\gamma}{2\pi} = 0,0426$ Hz/nT [24] nên đã dẫn tới sai số hệ thống, làm cho f_0 tính theo ProDiviner lớn hơn 1 Hz, góp phần lớn vào trường hợp $f_0 > f_R$ nêu trên.

Kết quả xử lý cho thấy tại các điem đo sâu đều có nước dưới đất tương tự. Riêng ở cọc 5 tuyến t1b tại điem đo sâu d5t1b-NL-37,5, sau đây gọi tắt là d5, trên sườn đồi, thuận lợi cho khoan, khai thác nước dưới đất, được chọn để khoan kiểm tra kết quả ĐSCHT nên sẽ trình bày kỹ dưới đây. Lỗ khoan có tọa độ: $22^{\circ}24'44''$ B, $103^{\circ}24'59''$ Đ; cao độ 862 m.

Thi công vào lúc bắt đầu mùa mưa giông với những cơn giông kéo dài, bắt đầu khoảng 2-3 giờ chiều đến quá nửa đêm nên chỉ có thể bố trí đo từ sáng sớm đến đầu buổi chiều. Điểm d5 được đo với 16 xung; $q_{16\max} = 4876 \text{ A}\cdot\text{ms}$. Theo giờ địa phương, đo 8 xung đầu tiên từ 8 giờ 10 phút đến 14 giờ 45 phút ngày 21/4/2007, giông làm gián đoạn, đo tiếp từ 8 giờ 10 phút đến 14 giờ 38 phút ngày 22/4/2007. Trong khi đó B_0 (cùng khoảng thời gian nhưng ghi theo giờ quốc tế) theo trạm địa từ Phú Thụy (<http://www.intermagnet.org/>) nhìn chung tăng khoảng 20 nT vào ngày 22/4 (làm thay đổi f_R như trong Bảng 1) cộng với lấy giá trị tần số Larmor sai như đã nêu trên dẫn đến 11 trên tổng số 16 xung với $\delta f > 1\text{Hz}$ (Bảng 1, Hình 1).

Bảng 1. Kết quả đo xung ở điểm d5; $\delta f = f_R - 1950,1$

q_i	1	2	3	4	5	6	7	8
f_{PD}	1951,8	1949,2	1951,6	1951,4	1951,5	1950,8	1951,5	1951,5
δf	1,7	-0,9	1,5	1,3	1,4	0,7	1,4	1,4
q_i	9	10	11	12	13	14	15	16
f_{PD}	1949,8	1952,6	1951,9	1952,3	1951,3	1952,3	1951,0	1950,6
δf	-0,3	2,5	1,8	2,2	1,2	2,2	0,9	0,5



Hình 1.

Nhiều điện từ lớn lại thay đổi nhiều, ngày 21/4/2007 nhiễu trong dải 260-585 nV, còn 22/4 nhiễu cao hơn hẳn trong dải 1091-2989 nV.

Tần số dòng xoay chiều đưa vào khung dây tạo ra cộng hưởng 1950,1 Hz, lại xấp xỉ với tần số của sóng hài dòng điện công nghiệp. Mặc dù đã dùng khung dây số 8 với số lần cộng dồn 400-512, đo mất 13 giờ 3 phút cũng chỉ đạt $S/N = 2,3$ với biên độ cực đại ở đỉnh đường cong đo sâu chỉ là 243 nV (ở q_{11}).

III. KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ XỬ LÝ SỐ LIỆU TỚI KẾT QUẢ NGHỊCH ĐẢO d5

1. Đặc điểm của nghịch đảo d5

Điểm đo sâu d5 trên tầng chứa nước khe nứt karst nên có thể dùng mô hình 1D [2]. Mô hình lý thuyết 1D dùng để nghịch đảo theo thuật toán làm trơn ranh giới của vùng nước được phân ra một số lớp với chiều dày nhất định cho mỗi lớp. Việc chọn số lớp cũng như chiều dày ảnh hưởng nhiều

tới kết quả nghịch đảo. Trong SAMOVAR, độ dày tầng cấp số cộng theo chiều sâu khi số lớp ≤ 12 ; khi số lớp > 12 thì phần nông trên cùng được chia thành các lớp có độ dày như nhau bằng 1m, trong đó lớp đầu tiên được đánh số 0 với chiều dày tính từ 0 m. Do T_2^* có độ chính xác thấp [8], nhất là trong điều kiện nhiễu điện từ lớn nên việc xây dựng phân bố nước theo chiều sâu chỉ dựa vào kết quả nghịch đảo w chứ không kết hợp với T_2^* [16, 33]. Hiện chưa có quy định chung về cách xác định ranh giới [16, 33] nên ở đây định vị trí đó theo hàm lượng nước, sao cho nó phải lớn hơn hoặc bằng phần sai số của hàm lượng nước cực đại của lớp nước.

Nghịch đảo sơ bộ cho thấy có hai vùng nước nông và sâu với các tham số có các chỉ số tương ứng là 0 và 1 như hàm lượng nước vùng nước nông w_0 và sâu w_1 , độ sâu của đỉnh vùng nước nông L_0 và sâu L_1 . Theo đó, L_0 khoảng chục mét, $w_0 < 1\%$ với chiều dày vài mét; L_1 hơn 20 m với $w_1 \approx 20\%$ và không thể khảo sát đáy do kích thước hạn chế của khung dây [12]. Do vậy, dưới đây đối với vùng nước nông sẽ khảo sát L_0, w_0 , không xét đáy do sai số rất lớn ngay khi không có nhiễu điện từ [11]; trong vùng nước sâu sẽ khảo sát L_1, w_1 , hàm lượng nước lớn nhất w_{1max} vùng nước sâu với độ sâu tương ứng $L(w_{1max})$. Trong quá trình xử lý số liệu sẽ dùng độ sâu lớn, kết quả cuối sẽ thể hiện tới độ sâu 40 m là tối đa đối với khung dây 37,5 m trong môi trường điện trở suất cao [13, 18].

Độ phân giải trong 1D suy giảm nhanh khi chiều sâu tăng [14, 16]. Độ sâu tối đa của phân giải bằng nửa kích thước khung dây [10].

2. Các tham số xử lý số liệu ảnh hưởng tới kết quả nghịch đảo

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng tới kết quả nghịch đảo, nhưng ở đây chỉ xét các yếu tố liên quan đến quá trình xử lý số liệu đã được thu thập. Khi khảo sát sự thay đổi kết quả nghịch đảo theo một tham số nào đó thì giữ nguyên các tham số khác với các giá trị hợp lý và bắt đầu lần lượt với các tham số ít phụ thuộc hơn vào các tham số khác. Trong quá trình xử lý sẽ chọn các tham số hợp lý nhằm thu được các kết quả nghịch đảo đại diện cho xử lý số liệu thống kê khi chưa bỏ và khi bỏ xung xấu. Ký hiệu $B(i)$, trong đó i là số thứ tự của xung xấu bị loại bỏ, không dùng trong xử lý và quy ước $B(0)$ là trường hợp không bỏ xung nào. Sau đây là các tham số lần lượt được khảo sát:

- *Thời gian ghi tw* : được chọn dựa trên quan sát tín hiệu cộng hưởng từ với tính chất suy giảm theo hàm mũ của tín hiệu.

- *Chọn bộ lọc nhiễu điện từ*: SAMOVAR có hai loại bộ lọc bằng số là dải thông và làm trung bình hoá. Strehl (2006) khuyên nên dùng bộ lọc dải thông với chú ý là bộ lọc này làm tăng thời gian hồi phục dẫn đến làm giảm biên độ của tín hiệu, cũng là làm giảm hàm lượng nước [28].

- *Độ sâu lớn nhất của ma trận (D_m)*: D_m không phải luôn bằng kích thước khung dây [23] và thay đổi [17] tùy theo điện trở suất của môi trường.

- *Chọn số lớp N_L khi mô hình hoá*: Trong SAMOVAR khi nghịch đảo có thể chọn chế độ tự động, khi đó số lớp N_L của mô hình bằng số xung đưa vào để nghịch đảo hoặc người dùng tùy chọn N_L . Không thể chọn N_L quá nhỏ, không phù hợp với thuật toán làm trơn cần nhiều lớp và cũng không quá lớn, khó định ranh giới. Số xung đo tối ưu là 16 [14, 24], nên cũng chọn số lớp N_L tối ưu là 16.

- *Tham số điều chỉnh R* : R khác nhau dẫn tới sự phân bố w khác nhau. R lớn làm trơn nhiều, R nhỏ làm trơn ít, nên chọn giá trị R vừa phải [34].

3. Ảnh hưởng các tham số xử lý số liệu tới kết quả nghịch đảo khi chưa bỏ các xung xấu

Sau đây sẽ xem xét ảnh hưởng của các tham số xử lý số liệu tới kết quả nghịch đảo ĐSCHT d5 khi chưa bỏ các xung xấu, nhằm tìm các tham số hợp lý cho các kết quả phù hợp về mặt vật lý, có tính chất đại diện trong xử lý thống kê.

Thời gian ghi 240 ms, nhưng nhiễu điện từ lớn nên chỉ có thể dùng đoạn $t_w = 150$ ms để đưa vào xử lý số.

Bộ lọc dải thông được khảo sát trong phạm vi 1-50 Hz với $t_w = 150$ ms, $D_m = 2a = 75,5$ m, $N_L = 16$ và R để ở chế độ tự động ($R = R_a$). Kết quả khảo sát thể hiện trên Bảng 2 cho thấy khi dải tần số mở rộng ra thì L_1 và $L(w_{1max})$ vẫn giữ nguyên một giá trị, còn w_{1max} và sai số làm tròn (SS) tăng dần tới giá trị tiệm cận. Ra không thay đổi nhiều (1000-1114); do vậy đã chọn giá trị dải tần số sao cho SS gần đạt ngưỡng tiệm cận mà w cũng đạt tới gần giá trị lớn nhất bù lại sự suy giảm w do dùng bộ lọc dải thông, đồng thời SS không quá lớn, đó là dải tần số 15 Hz. Khảo sát với bộ lọc làm trung bình (với hằng số thời gian 15 ms) cũng được kết quả tương tự (xem Bảng 2).

Bảng 2. Kết quả khảo sát với bộ lọc làm trung bình

Dải thông df (Hz)	L_1 (m)	w_{1max} (%)	$L(w_{1max})$ (m)	T_2^* (ms)	SS (%)	R_a
1	25,7	15,1	38,95	184,7	17,19	1113,9
5	25,7	16,3	38,95	177,4	17,62	999,5
10	25,7	17,1	38,95	166,2	19,09	1018,5
15	25,7	17,3	38,95	163,9	19,47	1052,9
25	25,7	17,3	38,95	163,9	19,57	1071,9
50	25,7	17,4	38,95	162,6	19,69	1075,7

Kết quả khảo sát độ sâu lớn nhất của ma trận (D_m) với môi trường điện trở suất cao ở 5t1b-NL-37,5 trong dải (1-4)a với $t_w = 150$ ms, $df = 15$ Hz, $R = R_a$ và $N_L = 16$ thể hiện trên Bảng 3. Chúng cho thấy $D_m = a$ là nhỏ nên tạo ra SS lớn nhất (30,41%) và có thể dùng dải $1,5a \leq D_m \leq 3a$. Với N_L nhất định, D_m lớn hơn có công sai lớn hơn, chiều dày mỗi lớp lớn hơn, sai số vị trí ranh giới lớn hơn; song sai số tương đối của L với các D_m khác nhau hoàn toàn có thể bỏ qua và ở đây chọn giá trị giữa dải: $D_m = 2a$.

Bảng 3. Kết quả khảo sát độ sâu lớn nhất

D_m	L_1 (m)	w_{1max} (%)	$L(w_{1max})$ (m)	T_2^* (ms)	SS (%)
1a	24,4	11,7		147,4	30,41
1,5a	26,8	18,9	39,50	207,0	19,28
2a	25,7	17,3	38,95	163,9	19,47
3a	25,9	16,6	30,35	97,8	19,52

4a	23,0	16,1	37,30	148,8	19,94
----	------	------	-------	-------	-------

Khảo sát số lớp N_L khi mô hình hoá trong dải $8 \leq N_L \leq 30$ với $t_w = 150$ ms, $d_f = 15$ Hz, $D_m = 2a = 75,5$ m và $R = R_a$ thể hiện trên Bảng 4. Nó cho thấy khi N_L tăng lên tới 20 thì L_1 vẫn bằng 25,7 m, chỉ khi N_L tăng lên quá nhiều thì L_1 mới giảm và bằng 23,9 m, SS hầu như không đổi (≈ 19 %) và cho thấy chọn $N_L = 16$ là phù hợp với khuyến cáo dùng 16 xung để đo là tối ưu [14].

Bảng 4. Kết quả khảo sát số lớp N_L

N_L	L_1 (m)	w_{1max} (%)	$L(w_{1max})$ (m)	T_2^* (ms)	SS (%)	R_a
8	25,7	15,6	34,95	144,7	19,38	3486,6
12	25,7	16,1	31,3	109,9	19,42	1720,4
16	25,7	17,3	38,95	163,9	19,47	1052,9
20	25,7	18,7	35,85	120,3	19,38	816,3
30	23,9	19,3	34,45	105,8	19,14	675,2

Theo Bảng 4 R_a chỉ thay đổi trong dải 675-3487. Giá trị lớn nhất 3487 do chọn $N_L = 8$ quá nhỏ so với yêu cầu làm tròn và do đã chọn $N_L = 16$ nên sẽ khảo sát R trong dải 0-3000 với $t_w = 150$ ms, $d_f = 15$ Hz, $D_m = 2a = 75,5$ m và $N_L = 16$ (Bảng 5, trong đó $R = 1052,9 = R_a$). Mặc dù R ảnh hưởng nhiều tới kết quả nghịch đảo, song cũng chỉ cho 2 giá trị: L_1 lớn (25,7 m) với R nhỏ, SS nhỏ và L_1 nhỏ (19,6 m) với R lớn và SS lớn hơn; R_a nằm trong khoảng giữa của dải R. Khi R tăng, giá trị w_{1max} mới đầu tăng rất nhanh tới cực đại rồi giảm dần chậm, còn T_2^* ngược lại, sớm có cực tiểu; SS lớn và tăng dần từ 18,3 đến 20,7%. Kết quả nghịch đảo cho thấy w_1 và T_2^* tăng dần theo chiều sâu khi $R \geq 5000$. Thống kê cho: $L_1 = 23 \pm 3$ m, $w_1 = 17,8 \pm 2,9$ %, $L(w_{1max}) = 36,3 \pm 4,5$ m, $T_2^* = 146 \pm 43$ ms và $SS = 19 \pm 1$ %.

Bảng 5. Kết quả khảo sát với số lớp $N_L = 16$

R	L_1 (m)	w_{1max} (%)	$L(w_{1max})$ (m)	T_2^* (ms)	SS (%)
0	25,7	14,3	29,70	193,3	18,32
10	25,7	15,6	29,70	155,2	18,34
100	25,7	23,8	38,95	84,7	18,37
500	25,7	19,1	29,70	85,1	18,72
1052,9	25,7	17,3	38,95	163,9	19,47
1500	25,7	16,8	38,95	171,0	20,15
2000	19,6	16,4	38,95	177,0	20,50
3000	19,6	15,6	38,95	186,5	20,74

Kết quả khảo sát trên đây cho thấy sau khi đã chọn tw , df và N_L phải nghịch đảo với R_a , sau đó lấy các giá trị R lớn hơn và nhỏ hơn R_a sao cho có hai giá trị L_1 . Chọn $R < R_a$ để lấy giá trị L_1 tương đối thuận lợi, còn lấy R quá lớn so với R_a sẽ cho phân bố w dưới sâu không thực tế (w_1 và T_2^* cứ tăng dần theo chiều sâu z), do vậy có thể xác định định lượng L_1 , còn các tham số nghịch đảo khác chỉ là ước lượng định lượng.

4. Ảnh hưởng các tham số xử lý số liệu tới kết quả nghịch đảo khi bỏ các xung xấu

Xung xấu ở đây gồm hai loại: 1) Điểm tách biệt (outlier) với biên độ đạt cực trị, tách khỏi đường cong đo sâu; và 2) $|\delta f| > 1$ Hz làm tín hiệu méo nhiều và giá trị T_2^* dị thường (≥ 1000 ms trên ProDiviner hoặc xung gần đỉnh đường cong đo sâu có T_2^* quá nhỏ (như q_{12} với $T_2^* = 98$ ms). Loại 1 chỉ có q_9 . Loại 2 có 11 trên tổng số 16 xung, nhưng chỉ khảo sát những q_i gần đỉnh đường cong đo sâu, gồm $i = 10, 11, 12, 13$ và 14 với δf lớn nhất, $\delta f > 1,2$ Hz. Khảo sát bỏ riêng từng xung xấu trước, sau đến bỏ kết hợp chúng một cách hạn chế với các tham số đã được chọn $tw = 150$ ms, $df = 15$ Hz, $D_m = 2a = 75,5$ m, 3 giá trị R lần lượt là $R = R_a$, $R < R_a$, $R > R_a$ và 2 giá trị N_L lần lượt với giá trị ở chế độ tự động (bảng số xung được đưa vào xử lý) và $N_L = 16$; như vậy có 6 kết hợp giữa 3 giá trị R với 2 giá trị N_L . 11 trường hợp bỏ xung xấu, gồm 6 trường hợp bỏ các xung xấu đơn: B(9), B(10), B(11), B(12), B(13), B(14) và 5 kết hợp: B(9,10), B(9,11), B(10,11), B(9,10,11), B(9,10,11,14), đem nghịch đảo theo 6 kết hợp cộng với 2 nghịch đảo B(0) cho bộ 68 số liệu của mỗi tham số kết quả nghịch đảo.

Bảng 6. Kết quả khảo sát với các trường hợp B khác nhau

No	R	R_a	N_L	L_1 (m)	w_{1max} (%)	$L(w_{1max})$ (m)	T_2^* (ms)	SS (%)
B(0)-f(D_m)		1052,9	16	25,7	17,3	38,95	163,9	19,47
B(0)-f(R)	3000		16	19,6	15,6	38,95	186,5	20,74
B(9)	300		15	23,9	22,2	35,35	96,6	18,50
B(9)	300		16	25,7	23,9	29,70	66,7	17,91
B(9)		1827,2	15	17,9	17,4	35,35	145,5	19,53
B(9)		906,0	16	25,7	18,9	29,70	78,5	19,01
B(9)	3000		15	17,9	16,0	35,35	161,8	21,32
B(9)	3000		16	19,6	15,9	38,95	180,5	20,57
B(9,11)	300		14	22,1	30,3	35,45	51,5	18,82
B(9,11)	300		16	25,7	32,6	29,70	37,6	17,90
B(9,11)		1388,5	14	22,1	18,6	35,45	92,5	19,31
B(9,11)		995,6	16	25,7	22,3	29,70	48,2	18,94
B(9,11)	2000		14	22,1	17,4	35,45	102,9	19,40
B(9,11)	2000		16	19,6	16,9	29,70	63,9	19,67
B(10,11)	300		14	30,0	24,4	35,45	61,0	12,13
B(10,11)	300		16	25,7	19,6	38,95	105,7	11,99
B(10,11)		503,5	14	22,1	19,8	35,45	78,7	12,54

B(10,11)		1121,5	16	25,7	16,1	38,95	156,2	12,65
B(10,11)	2000		14	22,1	14,2	35,45	138,3	13,77
B(10,11)	2000		16	25,7	15,0	38,95	177,9	13,69
B(9,10,11,14)	10		12	25,7	35,1	44,95	87,6	11,49
B(9,10,11,14)	10		16	25,7	60,8	38,95	47,8	9,040
B(9,10,11,14)		109,7	12	25,7	30,3	31,30	30,4	12,48
B(9,10,11,14)		109,7	16	25,7	29,6	38,95	73,2	10,94
B(9,10,11,14)	1000		12	25,7	17,7	31,30	54,7	12,97
B(9,10,11,14)	1000		16	25,7	17,1	38,95	154,9	12,31

Mặc dầu R và N_L ảnh hưởng nhiều tới kết quả nghịch đảo song kết quả xử lý cho thấy trong 6 kết hợp thì 3 giá trị R với mỗi giá trị N_L chỉ cho 2 giá trị L_1 , như vậy với 2 giá trị N_L sẽ có 4 giá trị L_1 (như trường hợp B(9) và B(12)), 3 giá trị L_1 (7 trường hợp: B(11), B(13), B(14), B(9,10), B(9,11), B(10,11), B(9,10,11)), 2 giá trị L_1 (B(10)) hoặc 1 giá trị L_1 (B(9, 10,11,14)); chỉ 4 trường hợp (gạch dưới dòng) đại diện cho 4 loại giá trị L_1 khác nhau được trình bày trên Bảng 6. Mọi trường hợp tăng R đều làm giảm L_1 .

IV. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ XỬ LÝ SỐ LIỆU THỐNG KÊ

Dùng 68 số liệu nghịch đảo với bộ lọc thông dải $df = 15$ Hz, $t_w = 150$ ms, $D_m = 2a = 75,5$ m, với 3 giá trị R: $R = R_a$, $R < R_a$, $R > R_a$ kết hợp lần lượt với giá trị N_L ở chế độ tự động và $N_L = 16$ cho 68 trường hợp không bỏ hoặc bỏ xung xấu được các số liệu thống kê cho vùng nước sâu nêu trong bảng 6. Với 68 trường hợp cũng chỉ cho 8 giá trị L_1 khác nhau trong dải (17,9 - 30,0) m. Theo cách tương tự cho bộ lọc làm trung bình với hằng số thời gian 15 ms, $t_w = 150$ ms, $D_m = 2a = 75,5$ m nhưng bỏ ít các xung xấu hơn, với 34 trường hợp cũng được các kết quả tương tự, nêu trong Bảng 7.

Đối với vùng nước nông dùng bộ lọc thông dải, kết quả thống kê cho $w_0 = (0,8 \pm 0,8) \%$ (68 số liệu, 3 trường hợp $w_0 = 0 \%$) và $L_0 = (9,1 \pm 0,9)$ m (65 số liệu).

Sự khác nhau giữa mực nước tĩnh 7,1 m đo được ngay sau khi khoan với $L_0 = 9,1$ m theo ĐSCHT vùng đá khe nứt là do cần một thời gian để nước khe nứt trở lại ổn định (như tại LK R-16 ở Israel, mực nước đo khi khoan là 17 m, sau 24 giờ ổn định ở mức 11m) và khi đó phù hợp với kết quả ĐSCHT [6]. Hơn nữa L_0 cho giá trị trung bình của một vùng rộng lớn.

Bảng 7. Các tham số ở các bộ lọc

Tham số	Bộ lọc thông dải (68 số liệu)		Bộ lọc làm trung bình (34 số liệu)	
	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Trung bình	Độ lệch chuẩn
L_1 (m)	24,0	2,7	24,8	1,9
w_{1max} (%)	20	7	18	2
$L(w_{1max})$ (m)	36	4	37	2

T_2^* (ms)	130	63	113	36
SS (%)	17,5	3,3	14,8	2,6

L_1 phù hợp so với mô tả lỗ khoan đoạn “(22 - 36) m với đá vôi màu xám xanh, nứt nẻ mạnh, có dấu hiệu nước lưu thông”, được đặt ống lọc [29]. Còn $L(w_{1max})$ xấp xỉ kích thước khung dây nên ít tin cậy.

Hàm lượng nước w_{1max} cao, hằng số thời gian suy giảm T_2^* (ms) thấp và lưu lượng thấp ($Q = 104 \text{ m}^3/\text{ngày}$) là những tính chất tiêu biểu của nước dưới đất trong đá vôi, do có hồng hoặc khe nứt chứa nước cô lập, tương tự như tại lỗ khoan 911 trong đá vôi ở Landon, phía Nam Thụy Điển với $w = 18,0 \%$, $T_2^* = 192 \text{ ms}$ và $Q = 72 \text{ m}^3/\text{ngày}$ [16, 33].

V. KẾT LUẬN

Số liệu đo sâu điểm d5 ở Nậm Loỏng không tốt, tỷ số tín hiệu trên nhiễu thấp ($S/N = 2,3$) và 11 trên 16 xung với dịch chuyển tần số lớn hơn 1 Hz. Ở đây đưa ra quy ước về cách xác định ranh giới trong thuật toán nghịch đảo làm tròn [16, 33] theo hàm lượng nước, sao cho nó phải lớn hơn hoặc bằng phần sai số của hàm lượng nước cực đại của tầng nước, trên cơ sở đó khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố tới kết quả nghịch đảo. Mặc dù kết quả nghịch đảo phụ thuộc nhiều yếu tố, nhất là tham số điều chỉnh R và số lớp trong mô hình N_L song các R khác nhau cũng chỉ cho vài giá trị ranh giới, nên trước hết nghịch đảo với R để ở chế độ tự động (R_a) $R = R_a$, sau đó chọn 2 giá trị R nữa với $R < R_a$ và $R > R_a$; tương tự như vậy đối với N_L với giá trị tối ưu bằng 16 [14] và khi để ở chế độ tự động với N_L bằng số xung đưa vào xử lý. Như vậy với mỗi trường hợp xử lý (khi bỏ một hoặc nhiều xung xấu) thực hiện 6 lần nghịch đảo của 3 giá trị R kết hợp với 2 giá trị N_L . Xử lý thống kê bộ 68 số liệu kết quả nghịch đảo cho đỉnh vùng nước nông $L_0 = (9,1 \pm 0,9) \text{ m}$ và sâu $L_1 = (24,0 \pm 2,7) \text{ m}$, khá phù hợp với kết quả khoan kiểm tra [6, 29]. Mặc dầu bài toán nghịch đảo đa trị, song kết quả nghịch đảo cho thấy độ sâu đỉnh lớp nước khá ổn định theo mô hình hoá toán học (không nhiễu) [11] và trong thực tế với kết quả đo mực nước tĩnh trong lỗ khoan khi S/N lớn với đỉnh nước rất nông ($L/a < 0,15$) [32] hoặc nông ($L/a < 0,38$) [12] và ở đây được kiểm nghiệm với nước sâu ($L/a = 0,64$) với S/N nhỏ.

Trong quá trình chuẩn bị số liệu để xử lý đã phát hiện phần mềm ProDiviner tính tần số Larmor f_0 , nhưng với giá trị tỷ số từ hồi chuyển làm tròn quá mức nên đã dẫn tới sai số hệ thống, nên f_0 tính theo ProDiviner lớn hơn 1,0 Hz.

Lời cảm ơn: Chúng tôi xin chân thành cảm ơn Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản đã tạo mọi điều kiện thuận lợi để thực hiện đề tài nghiên cứu khoa học công nghệ cấp Bộ: “Nghiên cứu áp dụng phương pháp cộng hưởng từ để tìm kiếm nước dưới đất một số vùng trọng điểm ở miền Bắc Việt Nam” [29] và chuyên gia Gerhard Lange đã hợp tác.

VĂN LIỆU

- Braun M., 2007.** Influence of the resistivity on magnetic resonance sounding: 1D inversion and 2D modelling. *PhD Thesis, Technical University of Berlin, 147 p.*
- Braun M., Yaramanci U., 2008.** Inversion of resistivity on magnetic resonance sounding. *J. of Applied Geophysics, 66/3-4 : 151-164.*
- Chalikakis K., Nielsen M.R., Legchenko A., 2008.** MRS applicability for a study of glacial sedimentary aquifers in Central Jutland, Denmark. *J. of Applied Geophysics, 66/3-4 : 176-187.*

4. **CODATA, 2006** (Committee on Data for Science and Technology). <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gammabar>
5. **Đỗ Tử Chung, Đoàn Thế Hùng, 2003.** Cộng hưởng từ proton - phương pháp trực tiếp tìm kiếm nước dưới đất. *TC Địa chất*, A/278 : 41-47. Hà Nội.
6. **Gev I., Goldman M., Rabinovich B., Rabinovich M., Issar A., 1996.** Detection of the water level in fractured phreatic aquifers using nuclear magnetic resonance (NMR) geophysical measurements. *J. of Applied Geophysics*, 34/4 : 277-282.
7. **Girard J.-F., Legchenko A., Boucher M., 2005.** Stability of MRS signal and estimation of data quality. *Near Surface Geophysics*, 3/3 : 187-194.
8. **Girard J.-F., Boucher M., Legchenko A., Baltassat J.-M., 2007.** 2D magnetic resonance tomography applied to karstic conduit imaging. *J. of Applied Geophysics*, 63/3-4 : 103-116.
9. **Lange G., Yaramanci U., and Meyer R., 2007.** Surface nuclear magnetic resonance. Chapter 4, 7 : 403-430. In: *Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies*. Eds: Knodel K., Lange G., Voigt H.-J., 1358 p., Springer-Verlag, Berlin.
10. **Legchenko A.V., Baltassat J.-M., Beauce A., Bernard J., 2002.** Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *J. of Applied Geophysics*, 50/1-2 : 21-46.
11. **Legchenko A.V., Baltassat J.-M., Bobachev A., Martin C., Robain H., and Vouillamoz J.-M., 2004.** Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. *Ground Water*, 42/3 : 363-373.
12. **Legchenko A.V., Descloitres M., Bost A., Ruiz L., Reddy M., Girard J.-F., Sekhar M., Kumar M.S.M., Braun J.-J., 2006.** Resolution of MRS Applied to the characterization of hard-rock aquifers. *Ground Water*, 44/4 : 547-554.
13. **Legchenko A., Ezersky M., Girard J.-F., Baltassat J.-M., Boucher M., Camerlynck C., Al-Zoubi A., 2008.** Interpretation of magnetic resonance soundings in rocks with high electrical conductivity. *J. of Applied Geophysics*, 66/3-4 : 118-127.
14. **Legchenko A.V., Shushakov O. A., 1998.** Inversion of surface NMR data. *Geophysics*, 63/1 : 75-84.
15. **Legchenko A.V., Valla P., 2002.** A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *J. of Applied Geophysics*, 50/1-2 : 3-19.
16. **Lubczynski M.W., Roy J., 2003.** Hydrogeological interpretation and potential of the new magnetic resonance sounding MRS method. *J. of Hydrology*, 283/1-4 : 19-40.
17. **Lubczynski M., Roy J., 2004.** Magnetic resonance sounding: New method for groundwater assessment. *Ground Water*, 42/2 : 291-303.
18. **Mohnke O., Yaramanci U., 2002.** Smooth and block inversion of surface NMR amplitudes and decay times using simulated annealing. *J. of Applied Geophysics*, 50/1-2 : 207-216.
19. **Müller-Petke M., Yaramanci U., 2008.** Resolution studies for magnetic resonance sounding (MRS) using the singular value decomposition. *J. of Applied Geophysics*, 66/3-4 : 165-175.
20. **Ngô Văn Bru, 2005.** Đo sâu cộng hưởng từ: Một công nghệ địa vật lý hiện đại phục vụ tìm kiếm trực tiếp nước dưới đất. *TC Địa chất*, A/291 : 45-55. Hà Nội.

21. Ngô Văn Bru, 2006. Địa vật lí cộng hưởng từ trong tìm kiếm trực tiếp nước dưới đất và carota dầu khí - công nghệ của thế kỉ 21. *TC Khoa học kỹ thuật Mỏ - ĐC*, 14 : 84-88, Hà Nội.
22. Ngô Văn Bru, Tăng Đình Nam, 2006. Kết quả thử nghiệm tìm kiếm nước dưới đất trực tiếp bằng đo sâu cộng hưởng từ đầu tiên ở Việt Nam. *TC Khoa học kỹ thuật Mỏ - ĐC*, 14 : 12-17. Hà Nội.
23. NUMIS–MRS (Magnetic Resonance Sounding) SYSTEM: NUMIS^{Plus}-NUMIS^{Lite}, 2004. User's manual. *IRIS Instruments*. Website: www.iris-instruments.com
24. NUMIS^{Plus} - Surface Proton Magnetic Resonance system for water prospecting, 2001. User's Guide. *IRIS Instruments*, Website: www.iris-instruments.com
25. NUMIS SOFTWARE FOR MRS (Magnetic Resonance Sounding) SYSTEM: NUMIS^{Plus}-NUMIS^{Lite}, 2004. User's manual. *IRIS Instruments*, Website: www.iris-instruments.com.
26. Semenov A.G., 1987. NMR hydroscope for water prospecting. *Proc. of Seminar on Geotomography, Indian Geophysical Union, Hyderabad*, p. 66-67.
27. Schirov M., Legchenko A., and Creer G., 1991. New direct noninvasive groundwater detection technology for Australia. *Exploration Geophysics*, 22 : 333-338.
28. Strehl S., 2006. Development of strategies for improved filtering and fitting of SNMR-signals. *Diploma Thesis, TU Berlin*, 111 p.
29. Tăng Đình Nam (Chủ nhiệm), Ngô Văn Bru, Vũ Thị Minh Nguyệt, Nguyễn Tiên Phong, Lương Thu Trang, 2008. Báo cáo "Nghiên cứu áp dụng phương pháp cộng hưởng từ để tìm kiếm nước dưới đất một số vùng trọng điểm ở miền Bắc Việt Nam". *Lưu trữ Viện KH ĐC&KS*. Hà Nội.
30. Trushkin D.V., Shushakov O. A., Legchenko A.V., 1994. The potential of a noise-reducing antenna for surface NMR groundwater surveys in the earth's magnetic field. *Geophysical Prospecting*, 42 : 855-862.
31. Vouillamoz J.M., Legchenko A., Albouy Y., Bakalowicz M., Baltassat J.M., Al-Fares W., 2003. Localization of saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Ground Water*, 41/5 : 578-586.
32. Vouillamoz J-M., Descloitres M., Toe G., Legchenko A., 2005. Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: Comparison with boreholes and pumping data in Burkina Faso. *Near Surface Geoph.*, 3/3 : 205-213.
33. Wattanasen K., Elming S-Å., 2008. Direct and indirect methods for groundwater investigations: A case-study of MRS and VES in the southern part of Sweden. *J. of Applied Geophysics*, 66/3-4 : 104-147.
34. Yaramanci U., Lange G., Hertrich M., 2002. Aquifer characterization using surface NMR jointly with other geophysical techniques at the Nauen/Berlin test site. *J. of Applied Geophysics*, 50/1-2 : 47-65.
35. Yaramanci M., Müller-Petke M., 2009. Improvements in inversion of magnetic resonance exploration-Water content, decay time, and resistivity, *J. of Earth Science*, 20/3 : 592-605.