

РАСЧЕТ СИГНАЛА ПРОТОННОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ОТ ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СРЕДЫ

О. А. ШУШАКОВ, А. В. ЛЕГЧЕНКО

*Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3, Россия*

Работа посвящена методу бесквaziнной геофизической томографии с использованием ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в магнитном поле Земли. Особенность метода в том, что сигнал ЯМР наблюдается только когда имеется подземная вода, обладающая магнитными ядрами.

Наличие электропроводности среды приводит к тому, что под земной поверхностью возникают вихревые токи, экранирующие магнитное поле. Расчет сигнала ЯМР с учетом электропроводности среды основан на преобразовании уравнений Максвелла с помощью магнитного потенциала Герца. Особенность данной задачи в том, что экранирование магнитного поля происходит дважды: при возбуждении магнитных ядер проводом, расположенным на поверхности, и при регистрации сигнала свободной индукции от магнитных ядер после выключения возбуждающего импульса. Поле от магнитных ядер рассчитывалось с использованием принципа взаимности.

Результаты расчетов показали, что амплитуда и фаза сигнала ЯМР от подземной воды значительно изменяются при величине удельного сопротивления среды от нескольких единиц до десятков Ом·м в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта.

Ядерный магнитный резонанс, электропроводность, подземные воды.

Метод геофизической томографии с использованием эффекта ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для бесквaziнной разведки подземной воды был разработан Семеновым с соавторами [1] и активно применяется в настоящее время для практических целей. В этом методе регистрируется сигнал магнитного резонанса от протонов воды в поле Земли $H_0 \sim 0,5$ Гс. Резонанс происходит при частоте внешнего переменного поля H_1 порядка 2 кГц. Уникальность метода в том, что наличие или отсутствие сигнала ЯМР однозначно свидетельствует о наличии или отсутствии подземной воды.

Практически важным и актуальным с точки зрения развития метода является учет влияния на сигнал ЯМР эффектов экранирования магнитного поля, обусловленных электропроводностью среды. Особый интерес представляет определение степени минерализации подземной воды различными солями. Высокой электропроводностью могут обладать не только породы, содержащие минерализованную воду, но и водоупорные, в частности, глинистые породы, удельное сопротивление которых может достигать величин порядка 1—10 Ом·м [2].

Бесквaziнный ЯМР в земном поле

Для регистрации сигнала от протонов подземной воды на земной поверхности располагается провод, обычно в форме круга диаметром порядка 100 м. По проводу пропускаются прямоугольные импульсы гармонически изменяющегося тока с частотой колебаний, равной частоте ларморовской прецессии протонов в магнитном поле Земли

$$\omega = \gamma_H \cdot H_0, \quad (1)$$

где γ_H — гиромангнитное отношение для протона, H_0 — геомагнитное поле. Наведенное под земной поверхностью переменное магнитное поле $H_1 e^{-i\omega t}$ поворачивает вектор намагниченности $M_0(r)$, создаваемой магнитными моментами ядер подземной воды в геомагнитном поле, на угол

$$\Theta = 0,5 \cdot \gamma_H \cdot H_{1\perp}(r) \cdot \tau_H, \quad (2)$$

где $H_{1\perp}(r)$ — перпендикулярная H_0 составляющая переменного поля петли, τ_H — длительность импульса тока, коэффициент 0,5 появляется из-за того,

© О. А. Шушаков, А. В. Легченко, 1994

что вектор H_1 поляризован линейно, а не по кругу. Значение намагниченности единицы объема образца в равновесии определяется выражением [3]

$$M_0 = n \cdot \frac{\gamma_H^2 \cdot \hbar^2 \cdot I \cdot (I + 1)}{3 \cdot k \cdot T} \cdot H_0, \quad (3)$$

где n — число магнитных ядер в единицу объема, I — ядерный спин, k — постоянная Больцмана, T — температура.

После окончания импульса внешнего поля H_1 величина перпендикулярной полю Земли H_0 ядерной намагниченности

$$M_{\perp}(r) = M_0 \cdot \sin \Theta. \quad (4)$$

Вектор перпендикулярной земному полю ядерной намагниченности прецессирует вокруг направления геомагнитного поля с ларморовской частотой (1). Сигнал ЯМР, создаваемый прецессирующей ядерной намагниченностью, находится с использованием принципа взаимности. В литературе, посвященной методу ЯМР для исследования скважин (ЯМР-каротаж), принцип взаимности обычно формулируется как принцип взаимной индуктивности. В этом случае магнитный дипольный момент элементарного объема, содержащего магнитные ядра, представляется в виде эквивалентного элементарного плоского контура, по которому протекает ток [4]. По теореме взаимной индуктивности находится поток магнитного поля от элемента объема $dV(r)$

$$d\Phi(r) = H_{\perp 1}(r) \cdot M_{\perp}(r) \cdot dV(r) / I, \quad (5)$$

где I — величина тока в петле. Интегрированием по объему подземного водоносного слоя находится ЭДС индукции, наводимой в петле магнитным полем от ядер воды, которая и является измеряемым сигналом ЯМР

$$e_0(q) = \omega \cdot \int_V M_0(r) \cdot h_{\perp 1}(r) \cdot \sin \Theta \cdot dV(r), \quad (6)$$

где $h_{\perp 1} = H_{\perp 1} / I$, $q = I \cdot \tau_n$ — интенсивность импульса тока в петле.

Подземная вода обычно находится в горизонтальных протяженных водоносных пластах. В этом случае $M_0(r) = M_0(z)$ и

$$e_0(q) = \int_0^{z_{\max}} K(q, z) \cdot M_0(z) \cdot dz, \quad (7)$$

где $K(q, z) = \omega \cdot \int h_{\perp 1}(r) \cdot \sin \Theta \cdot dx dy$, z — перпендикулярная земной поверхности координата [1].

Расчет нормального магнитного поля

В электропроводящей среде переменные магнитные поля от источника тока, а также от магнитных ядер воды экранируются вихревыми токами, индуцированными этими полями.

Для гармонически изменяющихся электрического и магнитного полей $H \cdot e^{-i\omega t}$, $E \cdot e^{-i\omega t}$ в электронейтральной среде с магнитной проницаемостью μ , удельной электропроводностью σ , диэлектрической проницаемостью ϵ из уравнений Максвелла следует:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } H = (\sigma - i\omega \epsilon) \cdot E, \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } E = i\omega \mu H, \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{div } H = \text{div } E = 0. \end{array} \right. \quad (10)$$

Для преобразования уравнений (8)—(10) обычно пользуются так называемыми магнитными потенциалами [5, 6], в частности магнитным потенциалом Герца Π^* [7]:

$$E = i\omega \mu \text{rot } \Pi^*, \quad (11)$$

$$H = \text{rotrot } \Pi^*. \quad (12)$$

Из (8)–(12) следует, что магнитный потенциал Герца Π^* описывается однородным уравнением Гельмгольца

$$\Delta \Pi^* + k^2 \Pi^* = 0, \quad (13)$$

где $k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu + i \omega \sigma \mu$, k имеет смысл волнового числа.

Нормальным называют поле в присутствии двух однородных полупространств — непроводящего (воздуха) и электропроводящего (земли) [2]. Задача о нахождении нормального поля магнитного диполя впервые была решена Зоммерфельдом [8]. Нормальное поле на границе раздела вблизи горизонтальной рамки изучалось в работах [9, 10], в ближней зоне около рамки — в работе [11]. Более подробную библиографию можно найти, например, в [12].

В использованной для расчетов модели (рис. 1) петля из провода (рамка) расположена в системе цилиндрических координат (r, φ, z) так, что провод расположен вдоль окружности $r = R_0$ в плоскости $z = -h$. Однородная изотропная среда с удельной электропроводностью σ_1 занимает полупространство $z > 0$, электропроводность воздуха σ_0 . В силу аксиальной симметрии отличной от нуля будет лишь компонента Π_z^* . Для этого случая уравнение (14) удобно представить в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial^2 \Pi_z^*}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi_z^*}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Pi_z^*}{\partial z^2} + k^2 \Pi_z^* = 0. \quad (14)$$

Общее решение для магнитного потенциала нормального поля горизонтальной петли имеет следующий вид:

$$\Pi_{z0}^* = \frac{IR_0}{2} \int_0^\infty \left[e^{-u_0(z+h)} + R_1(m) e^{u_0 z} \right] \frac{J_1(R_0 m)}{u_0} J_0(rm) dm, \quad (-h \leq z \leq 0), \quad (15)$$

$$\Pi_{z1}^* = \frac{IR_0}{2} \int_0^\infty Q_1(m) e^{-u_1 z} \frac{J_1(R_0 m)}{u_1} J_0(rm) dm, \quad (z > 0), \quad (16)$$

где $u = (m^2 - k^2)^{1/2}$, J_0, J_1 — функции Бесселя.

Решение для компонент магнитного поля от петли с учетом (12) выглядит следующим образом:

$$H_z = \frac{IR_0}{2} \int_0^\infty \frac{2m^2}{u_0 + u_1} e^{-u_1 z - u_0 h} J_1(R_0 m) J_0(rm) dm, \quad (17)$$

$$H_r = \frac{IR_0}{2} \int_0^\infty \frac{2mu_1}{u_0 + u_1} e^{-u_1 z - u_0 h} J_1(R_0 m) J_1(rm) dm. \quad (18)$$

При расчетах полагалось в воздухе $u_0 \approx m$, $h \rightarrow 0$.

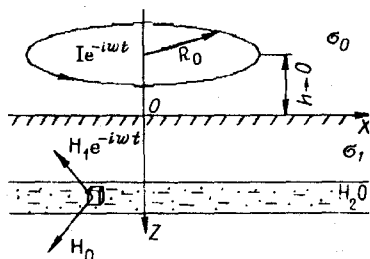


Рис. 1. Схема расположения возбуждающего контура радиуса R_0 , модельных полупространств с удельной электропроводностью σ_0 (воздух) и σ_1 (земля) и координатной системы.

Условно показаны магнитные поля, действующие на элемент объема водоносного горизонта: постоянное геомагнитное поле H_0 и переменное поле от петли с током $H_1 e^{-i\omega t}$

В процессе формирования сигнала ЯМР экранирование магнитного поля за счет электропроводности среды происходит дважды: первый раз — во время действия возбуждающего импульса происходит экранирование поля $H_{1\perp}$, создаваемого петлей. второй раз — во время наблюдения сигнала ЯМР происходит экранирование поля, создаваемого магнитными моментами ядер, свободно прецессирующими в магнитном поле Земли.

Задача расчета поля, создаваемого прецессирующими магнитными моментами ядер, с учетом экранирования, обусловленного электропроводностью среды, является весьма трудоемкой ввиду отсутствия цилиндрической симметрии при произвольном угле наклона геомагнитного поля. Поэтому в таком случае целесообразно использование принципа взаимности [5, 6], что позволяет вычислять магнитное поле, создаваемое магнитными ядрами, находящимися в элементе объема водоносного слоя, зная магнитное поле от петли, расположенной на поверхности.

Расчет сигнала ЯМР с учетом электропроводности среды

При наличии электропроводности среды в выражениях (2), (6) поле $H_{1\perp}$ является комплексным. Следовательно, сигнал ЯМР является также комплексной величиной, имеющей амплитуду и фазу. Из векторной модели формирования сигнала ЯМР [3] получается следующее выражение:

$$e_0(q) = \omega \cdot \int_V M_0(r) \cdot (h_{1\perp}^2(r) / |h_{1\perp}(r)|) \cdot \sin \Theta \cdot dV(r), \quad (19)$$

где

$$\Theta = 0,5 \cdot \gamma_H \cdot |H_{1\perp}(r)| \cdot \tau_H. \quad (20)$$

Результаты и обсуждение

Приведенные на рис. 2 в качестве примера зависимости амплитуды сигнала ЯМР от интенсивности импульса возбуждения рассчитывались для горизонтальных водоносных горизонтов мощностью 10 м, расположенных на различной глубине (10—20, 30—40 и 50—60 м) в однородных полупространствах различной электропроводности. Наклон геомагнитного поля принимался равным 90° .

Результаты расчетов показывают, что за счет влияния электропроводности среды значительно искажается амплитуда и фаза сигнала ЯМР. Характерные величины удельного сопротивления, при которых происходят изменения, тем больше, чем больше глубина залегания водоносного горизонта. Эта зависимость коррелирует с зависимостью толщины скин-слоя δ от удельного сопротивления. Для частоты 2500 Гц

$$\delta \cong 10 \cdot \rho^{1/2}, \quad (21)$$

где ρ — удельное сопротивление. При $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\delta \cong 10 \text{ м}$, при $\rho = 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\delta \cong 50 \text{ м}$. Более тонкие волновые эффекты типа интерференции можно ожидать в слоистых средах, но их рассмотрение выходит за рамки данной работы.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды и фазы сигнала ЯМР для слоя воды от 10 до 20 м, расположенного в однородном полупространстве с удельным сопротивлением 1 Ом·м, при различных значениях угла наклона магнитного поля Земли. Из результатов расчета, показанных на рис. 3, следует, что влияние электропроводности на сигнал ЯМР сильнее, чем зависимость от угла наклона геомагнитного поля. Это связано с тем, что при высокой электропроводности среды вертикальная компонента магнитного поля ослабляется сильнее, чем горизонтальная.

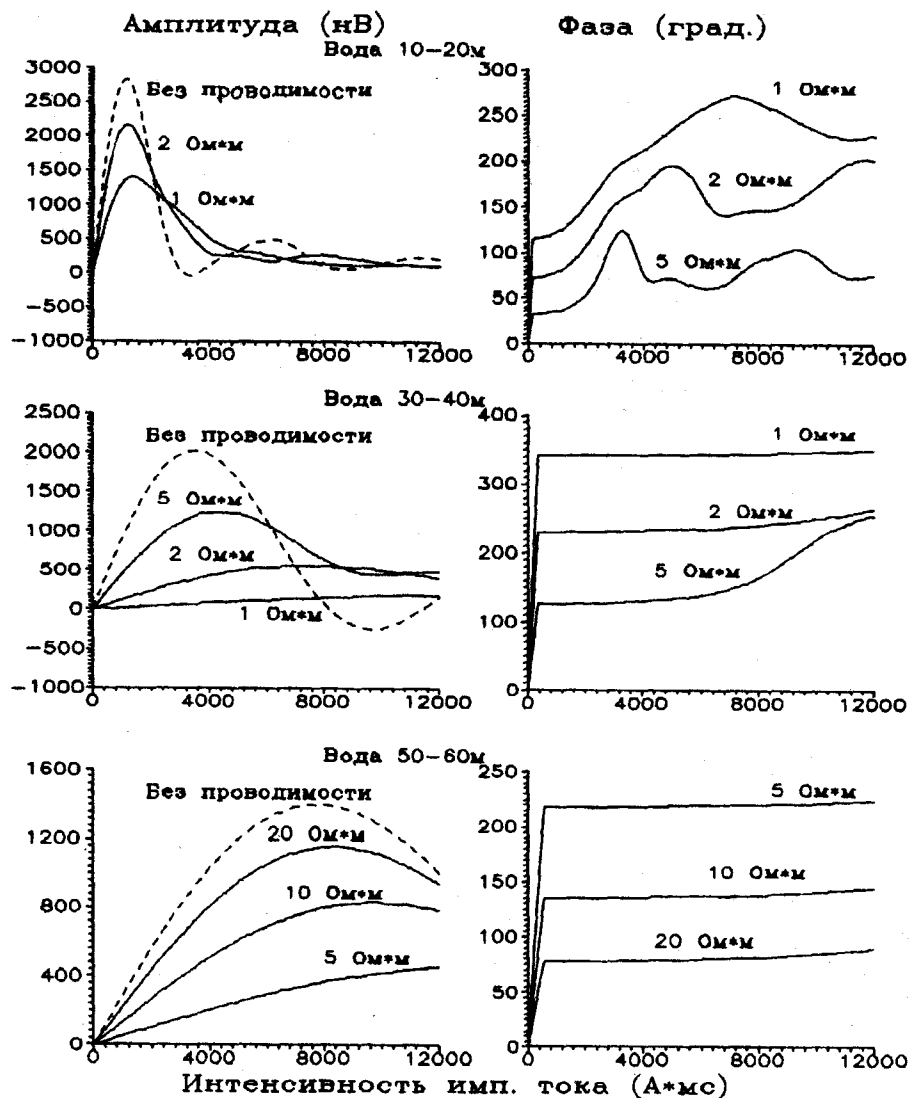


Рис. 2. Зависимость амплитуды и фазы сигнала ЯМР от интенсивности импульса возбуждения для различных значений удельного сопротивления проводящего полупространства и для разных глубин залегания водоносного горизонта мощностью 10 м.

Основные выводы

1. В работе проведены расчеты сигнала ЯМР от подземной воды с учетом влияния электропроводности среды, рассматриваемой в виде однородного полупространства. Показано, что при удельном сопротивлении среды от нескольких единиц до десятков Ом·м, в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта, амплитуда и фаза сигнала ЯМР могут значительно изменяться за счет экранирования магнитного поля.

2. В указанном диапазоне электропроводности среды подтверждается значительным изменениям форма кривой (в частности, положение максимума) сигнала ЯМР в зависимости от интенсивности импульса возбуждающего тока.

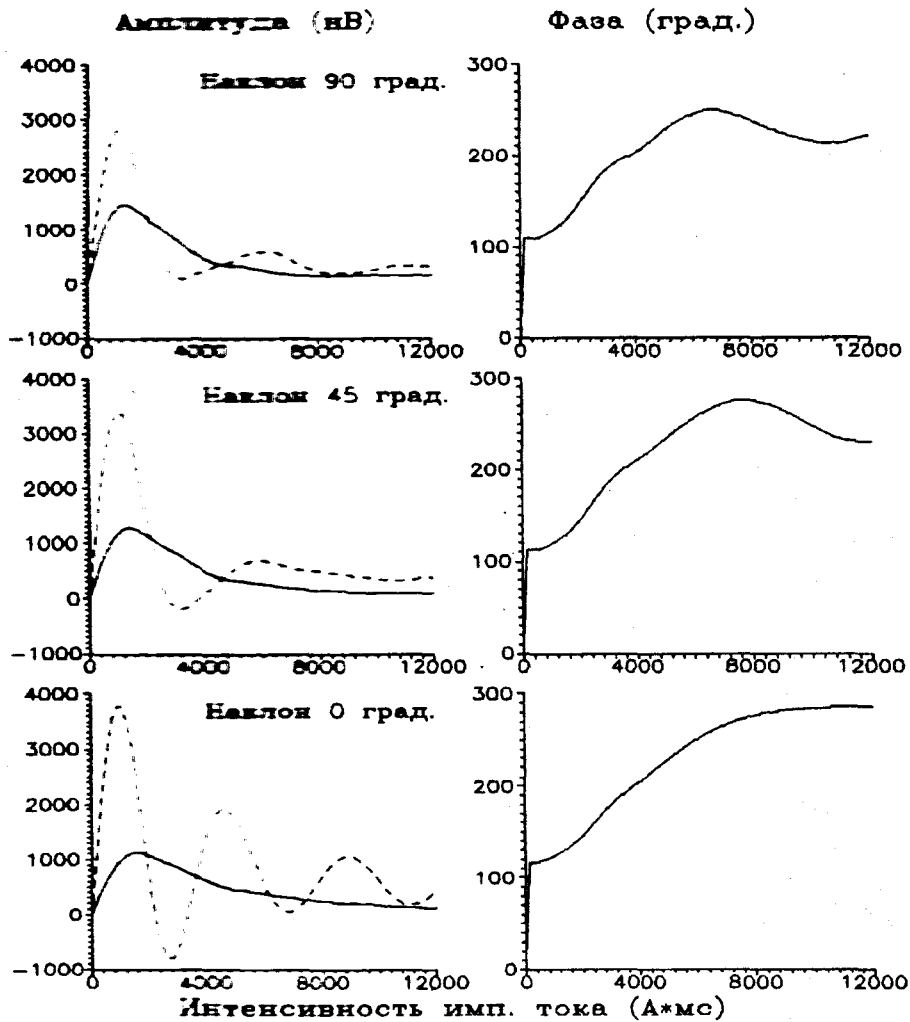


Рис. 3. Зависимость амплитуды и фазы сигнала ЯМР от интенсивности импульса возбуждения при разных углах наклона геомагнитного поля.

Удельное сопротивление полупространства 1 Ом·м. Пунктиром показан сигнал в отсутствие электропроводности.

3. Исследована зависимость амплитуды и фазы сигнала ЯМР от угла наклона геомагнитного поля с учетом экранирования магнитного поля за счет электропроводности среды. Показано, что величина наклона геомагнитного поля в указанном диапазоне изменения электропроводности среды не оказывает значительного влияния на величину сигнала ЯМР.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1070063 (СССР). Устройство для измерения параметров залежей подземных минералов / Семенов А. Г., Бурштейн А. И., Пусеп А. Ю., Щиров М. Д. Оpubл. в БИ, 1988, № 13.
2. Электроразведка. В 2 т. / Под ред. В. К. Хмелевского, В. М. Бондаренко. М., Недра, 1989, т. 1, 438 с., т. 2, 378 с.
3. Абрагам А. Ядерный магнетизм. М., Изд-во иностр. лит., 1963, 551 с.
4. Дахнов В. Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. М., Недра, 1981, 344 с.
5. Ильинский А. С., Кравцов В. В., Свешников А. Г. Математические модели электродинамики. М., Высш. шк., 1991, 224 с.

6. Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Л., Гостоптехиздат, 1937, 986 с.
7. Nisbet A. Hertzian electromagnetic potentials and associated gauge transformations // Proc. Roy. Soc. Ser., 1955, A, v. 231, № 1185, p. 250—263.
8. Sommerfeld A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie // Ann. d. Phys., 1926, Bd 81, p. 1135—1153.
9. Wait J. R. Mutual coupling of wire loops lying on a homogeneous ground // Geophysics, 1954, v. 19, № 2, p. 290—296.
10. Косенков О. М. Электромагнитное поле круговой петле на границе земля—воздух. Изв АН СССР. Сер. геофиз., 1963, № 12, с. 1845—1851.
11. Ryu J., Morrison H. F., Ward S. H. Electromagnetic field about a loop source of current // Geophysics, 1970, v. 35, № 5, p. 862—897.
12. Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм. М., Недра, 1987, 235 с.

*Рекомендована к печати
Ю. Н. Антоновым*

*Поступила в редакцию 7 декабря 1992 г.,
после доработки — 1 октября 1993 г.*

O. A. Shushakov and A. V. Legchenko

CALCULATION OF UNDERGROUND WATER PROTON MAGNETIC RESONANCE SIGNAL WITH REGARD TO CONDUCTIVITY

A non-drilling water prospecting geophysical tomography method with use of nuclear magnetic resonance (NMR) in the earth magnetic field is under consideration. The significance of technique is that a NMR signal is observed only if there exists subterranean water, containing magnetic nuclei. The conductivity leads to the appearance of subsurface circular currents shielding the magnetic field of the loop as well as the field of magnetic nuclei. The calculation is based on the transformation of Maxwell equations using magnetic Hertz potentials. The significance of the problem is that the alternating magnetic field is doubly shielded owing to electrical conductivity of medium. First, the field of the loop is shielded under exciting pulse. Then, the field, created by nuclear magnetization, is shielded upon NMR signal observation. The field of magnetic nuclei was calculated with the use of the reciprocity principle. The conductivity has been shown to have an effect on the NMR signal phase and amplitude at the resistivity of a few Ohm·m or tens of Ohm·m depending on the depth of water-bearing horizons.