

ПРОТОННЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС ОТ ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТЫХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

О. А. ШУШАКОВ, А. В. ЛЕГЧЕНКО

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

Измерение сигнала ядерного магнитного резонанса (ЯМР) от подземной воды проводилось ЯМР-томографом „Гидроскоп“, разработанным в Институте химической кинетики и горения СО РАН. Отличие от стандартной методики состояло в том, что измерялась не только амплитуда, но и фаза сигнала ЯМР. Экспериментальные исследования проводились на участке Соляноозерный вблизи пос. Малиновое Озеро Алтайского края. Результаты измерений сопоставлялись с расчетами для горизонтально-слоистых сред, в которых использовались ранее известные данные бурения скважин, электроразведки, химического состава по результатам отбора проб. Расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой. Показано, что для определения степени минерализации подземной воды недостаточно измерения только амплитуды и фазы сигнала ЯМР.

Ядерный магнитный резонанс, электропроводность, подземные воды.

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в земном магнитном поле для бесскважинного поиска подземной воды был предложен в [1]. В [2] были проведены расчеты влияния электропроводности среды на сигнал ЯМР от подземной воды. Рассматривалась модель среды в виде двух однородных полупространств — непроводящего (воздух) и электропроводящего (земля). Было показано, что при удельном сопротивлении среды от единиц до нескольких десятков Ом·м, в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта, амплитуда и фаза сигнала ЯМР могут значительно изменяться.

Данная работа является продолжением [2], ее цель — сравнение с экспериментальными данными результатов расчетов сигнала ЯМР в присутствии электропроводящей среды. Особенность реальной среды состоит в том, что ее не всегда удастся описать простой моделью в виде однородного полупространства. Поэтому для сравнения с экспериментом использовалось более общее приближение в виде горизонтально-слоистой среды.

Расчет магнитного поля в горизонтально-слоистой среде

Горизонтально-слоистой в электроразведке называют среду, состоящую из однородных и изотропных слоев, разделенных горизонтальными границами. Внутри каждого слоя удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость (σ , ϵ , μ) считаются постоянными. Горизонтально-слоистая среда является цилиндрически симметричной, поэтому при описании поля применяют цилиндрическую систему координат (r , φ , z); ось z направлена по вертикали.

Изучению магнитных полей в горизонтально-слоистых средах посвящена обширная литература. Поле магнитного диполя над горизонтально-слоистой средой изучалось в работах Уэйта [3, 4]; более подробную библиографию см. в [5]. В работах [6—8] и ряде других изучались поля горизонтального и вертикального магнитных диполей, когда источник и приемник располагались на поверхности горизонтально-слоистой среды; авторами приводятся методики расчетов и результаты для двух- и трехслойной среды и рекуррентные формулы для расчета полей над горизонтально-слоистой средой с произвольным числом слоев. Электромагнитное поле в ближней зоне около рамки рассчитывалось в [9]. Более подробный обзор литературы можно найти в монографиях [5, 10—12].

В настоящей работе рассчитывалось магнитное поле от провода в форме круга радиусом R_0 , расположенного на поверхности земли ($z = 0$), по которому протекает ток $I \cdot e^{-i\omega t}$. Воздух занимает полупространство $z < 0$ с электропроводностью $\sigma_0 = 0$. Земля считалась состоящей из трех слоев с различной

удельной электропроводностью: $\sigma = \sigma_1$ ($0 < z < z_1$), $\sigma = \sigma_2$ ($z_1 < z < z_2$) и $\sigma = \sigma_1$ ($z > z_2$). Таким образом, земля рассматривалась как вмещающее полупространство с удельной электропроводностью σ_1 , в котором на глубинах от z_1 до z_2 имеется горизонт с отличающейся электропроводностью σ_2 . Двух-слойная среда является частным случаем рассматриваемой модели при $z_1 = 0$.

Компоненты магнитных полей в слоях 1, 2, 3 для рассматриваемого случая описываются следующими выражениями:

$$H_{r1} = \frac{IR_0}{2c} \int_0^{\infty} (Q_1 e^{-u_1 z} - R_1 e^{u_1 z}) m u_1 J_1(R_0 m) J_1(rm) dm, \quad (1)$$

$$H_{z1} = \frac{IR_0}{2c} \int_0^{\infty} (Q_1 e^{-u_1 z} - R_1 e^{u_1 z}) m^2 J_1(R_0 m) J_0(rm) dm, \quad (2)$$

$$H_{r2} = \frac{IR_0}{2c} \int_0^{\infty} (Q_2 e^{-u_2 z} - R_2 e^{u_2 z}) m u_2 J_1(R_0 m) J_1(rm) dm, \quad (3)$$

$$H_{z2} = \frac{IR_0}{2c} \int_0^{\infty} (Q_2 e^{-u_2 z} - R_2 e^{u_2 z}) m^2 J_1(R_0 m) J_0(rm) dm, \quad (4)$$

$$H_{r3} = \frac{IR_0}{2c} \int_0^{\infty} Q_3 e^{-u_1 z} m u_1 J_1(R_0 m) J_1(rm) dm, \quad (5)$$

$$H_{z3} = \frac{IR_0}{2c} \int_0^{\infty} Q_3 e^{-u_1 z} m^2 J_1(R_0 m) J_0(rm) dm, \quad (6)$$

где $u = (m^2 - k^2)^{1/2}$, $k^2 = \omega^2 \epsilon \mu + i \omega \sigma \mu$, J_0, J_1 — функции Бесселя [2].

Значения коэффициентов имеют следующий вид:

$$Q_1 = \frac{2\xi}{D}, \quad (7)$$

$$R_1 = -\frac{2N(1 - e^{-2u_2 h}) e^{-2u_1 z_1}}{D}, \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{4e^{(u_2 - u_1) z_1}}{(X+1)D}, \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{4N e^{-2u_2 h - (u_1 + u_2) z_1}}{(X+1)D}, \quad (10)$$

$$Q_3 = \frac{8X e^{-(u_2 - u_1) h}}{(X+1)^2 D}, \quad (11)$$

где $h = z_2 - z_1$, $X = u_2 / u_1$, $N = \frac{X-1}{X+1}$, $\xi = 1 - N^2 e^{-2u_2 h}$, $D = (1 + u_1 / m) \cdot \xi + (1 - u_1 / m) \cdot N \cdot (e^{-2u_2 h} - 1) e^{-2u_1 z_1}$.

Поле от магнитных ядер рассчитывалось с помощью принципа взаимности. Это стандартный прием, часто используемый, например, в методе ЯМР-каротажа [10]. Для общего случая доказательство приводится в [13].

Экспериментальная часть

Измерения сигнала протонного магнитного резонанса от подземной воды производились ЯМР-томографом „Гидроскоп“, разработанным А. Г. Семеновым с соавторами [1]. Отличие от стандартной методики [1] состояло в том, что измерялась не только амплитуда, но и фаза сигнала ЯМР. Зависимость фазы сигнала ЯМР от степени электропроводности почвы была впервые экспериментально доказана в [14].

Экспериментальные исследования проводились на участке Соляноозерный вблизи пос. Малиновое Озеро Алтайского края. Результаты измерений сопоставлялись с ранее известными данными по бурению скважин, электро-

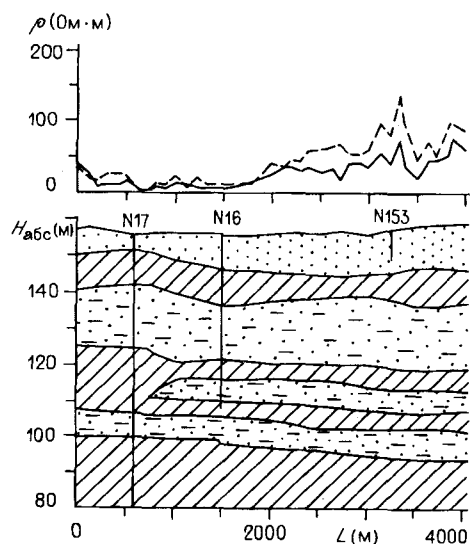


Рис. 1. Схема вертикального геологического разреза участка, на котором исследовалось влияние электропроводности на сигнал ЯМР от подземной воды.

Вверху приведена зависимость удельного сопротивления среды вдоль разреза на малых, до 25 м (сплошная линия), больших, до 60 м (штрих), глубинах.

разведки (ВЭЗ) и данными о химическом составе. Эти сведения были получены при содействии М. Д. Щирова в ПГО Запсибгеология по отчету 1988 г. Бийско-Барнаульской партии о результатах поисковых геофизических работ за 1982—1988 гг.

На рис. 1 схематически изображен вертикальный геологический

разрез участка, на котором проводились измерения. Особенность рассматриваемого участка в том, что электропроводность среды изменяется вдоль разреза. В месте расположения скв. 153 удельное сопротивление среды по данным электроразведки составляет величину ~ 50 Ом·м на глубинах порядка 25 м и ~ 100 Ом·м на глубинах порядка 60 м. В месте расположения скв. 16 удельное сопротивление составляет соответственно 4 и 7 Ом·м, в месте расположения скв. 17 — 1,5 и 7 Ом·м соответственно.

По данным бурения скв. 17 и отбора проб имеются два основных водоносных слоя: 13—31,3 м с минерализацией 12 г/л и 49,5—55,8 м с минерализацией 0,4 г/л.

В месте расположения скв. 16 имеются три водоносных слоя: мощный слой от 19 до 34,2 м с минерализацией 3 г/л, слой 39—45 м с минерализацией 0,47 г/л, слой 49—57 м.

Последний слой определялся по данным рис. 1, поскольку бурение скв. 16 производилось до 48 м. Геологический разрез, изображенный на рис. 1, получен геофизиками по результатам бурения по всей площади участка, а не только на указанном разрезе, поэтому предполагалось, что он имеет достаточную степень достоверности. Кроме того, как будет показано в дальнейшем, из результатов расчетов следует, что при большой величине электропроводности глубоко расположенные водоносные слои дают малый вклад в сигнал ЯМР. Поэтому данное предположение не приводит к большой ошибке.

Границы водоносных слоев в месте расположения скв. 153 определялись также по разрезу, изображенному на рис. 1. Обводненность (процентное содержание воды) в этих слоях определялась по результатам измерения сигнала ЯМР-томографом „Гидроскоп“. Кроме того, положения границ водоносных слоев, полученные в результате решения обратной задачи определения границ слоев и содержания воды в них по сигналу ЯМР, хорошо согласуются с данными рис. 1. Полученная при этом информация достаточно достоверна, поскольку среда в данном месте обладает высоким удельным сопротивлением.

Поскольку расстояние между крайними скважинами мало и составляет 2,7 км, предполагалось, что обводненность слабо изменяется в пределах каждого водоносного слоя.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды и фазы сигнала ЯМР для слоя воды 50—60 м, расположенного в горизонтально-слоистой среде. Проводящий слой мощностью 10 м и удельным сопротивлением 1 Ом·м, располагается над водоносным, под водоносным и совпадает по глубине с водоносным

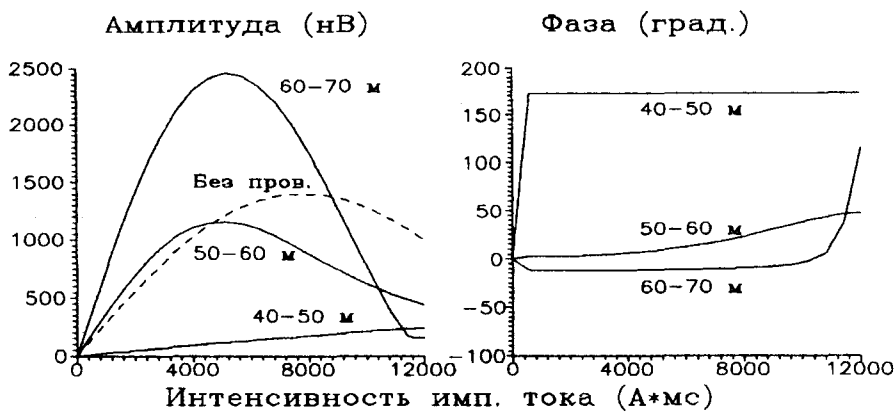


Рис. 2. Рассчитанная для модели трехслойной среды зависимость амплитуды и фазы сигнала ЯМР от относительного расположения водоносного и проводящего слоя с удельным сопротивлением $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Водоносный слой расположен на глубине 50—60 м. Приведены глубины расположения проводящего слоя, штрихом показана амплитуда сигнала ЯМР в отсутствие электропроводности среды.

горизонтом. При совпадении глубин проводящего и водоносного слоев, чему на практике соответствует случай сильно минерализованного водоносного горизонта, расположенного в слабоэлектропроводной среде, амплитуда и частота осцилляций сигнала ЯМР изменяются тем сильнее, чем больше толщина слоя. Фаза сигнала в этом случае практически не изменяется. В [14] было предложено по измеренной фазе сигнала ЯМР определять степень минерализации подземной воды. Данный пример показывает, что измерения только амплитуды и фазы сигнала ЯМР недостаточно для того, чтобы провести различие между минерализованной и пресной водой.

На рис. 3 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных для амплитуды и фазы сигнала ЯМР в местах расположения скв. 153, 17 и 16. При расчетах предполагалось, что в месте расположения скв. 153 имеются три водоносных слоя: 15—35; 42,5—49,5 и 54—61 м с содержанием воды 29, 17 и 5 % соответственно. Удельное сопротивление среды принималось равным $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на глубинах 0—25 м, $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ — на 25—60 м.

Для скв. 17 расчеты производились для двух водоносных слоев: 13—31,3 и 49,5—55,8 м с содержанием воды 30 и 5 % соответственно. Удельное сопротивление принималось $1,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на глубинах 0—25 м и $5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на 25—60 м.

Для скв. 16 рассчитывался сигнал ЯМР от трех слоев: 19—34,2 м (30 % воды), 39—45 м (20 % воды) и 49—57 м (5 % воды). Удельное сопротивление среды принималось $4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на глубинах 0—25 м и $7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на 25—60 м.

Из рис. 3 следует, что результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными в пределах ошибки измерения бесскважинного ЯМР в земном поле. Эта ошибка складывается из аппаратных и экспериментальных погрешностей, а также влияния атмосферных и других природных факторов в процессе измерения. Кроме того, данные бурения, использованные в расчетах, известны с ограниченной точностью, поскольку бурение производилось в поперечнике размером менее метра, а размер исследуемого бесскважинным ЯМР образца $\sim 100 \text{ м}$. Суммарная экспериментальная ошибка не превышала нескольких процентов от максимального сигнала ЯМР.

Следует отметить, что амплитуды сигнала ЯМР для скв. 16 и 17 в отсутствие электрической проводимости, показанные на рис. 3 штрихом, приблизительно соответствуют амплитуде сигнала для скв. 153, в то время

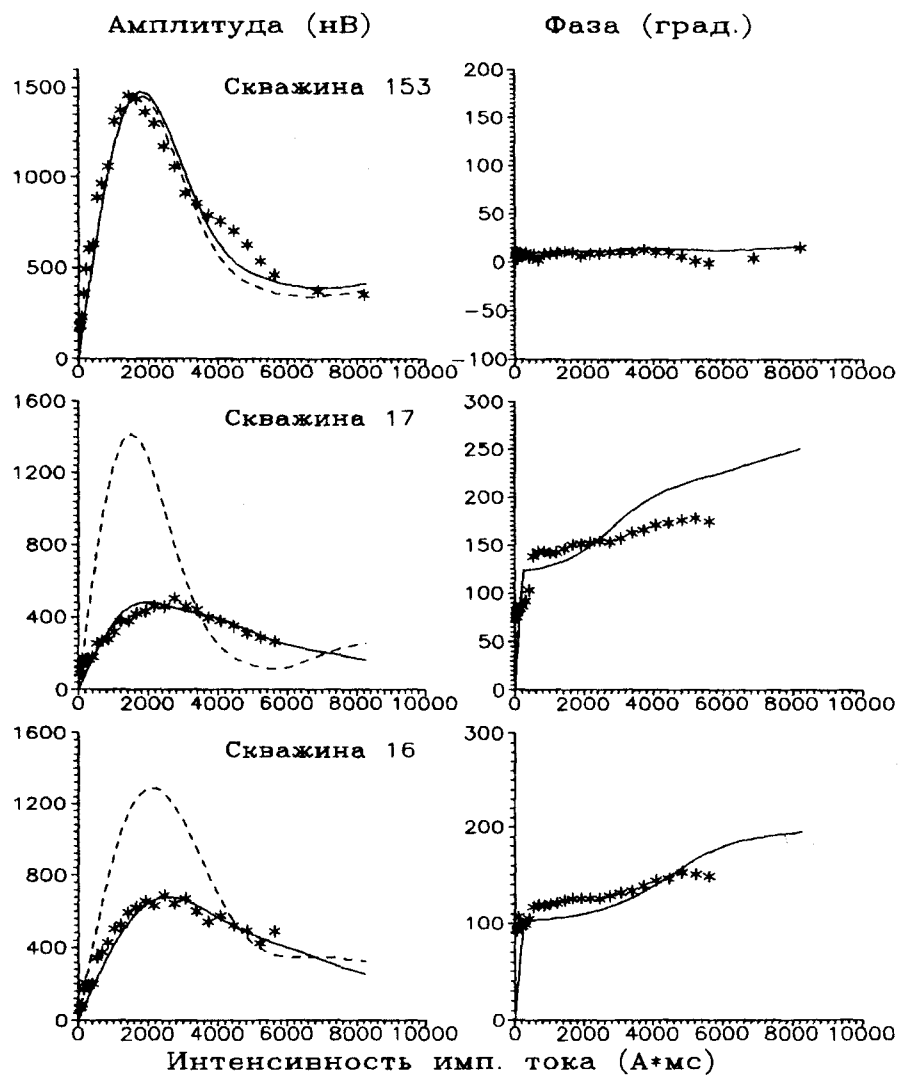


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета зависимости амплитуды и фазы сигнала ЯМР от интенсивности импульса возбуждения.

Точками показаны экспериментальные данные, штрихом — рассчитанный сигнал в отсутствие электропроводности.

как влияние электрической проводимости приводит к тому, что амплитуда сигнала ЯМР уменьшается приблизительно в три раза для скв. 17 и в два раза для скв. 16.

Основные выводы

1. Исследованы некоторые особенности поведения сигнала ЯМР от подземной воды, находящейся в трехслойной среде. Показано, что для определения степени минерализации подземной воды недостаточно измерения только амплитуды и фазы сигнала.

2. Проведено сравнение с экспериментальными данными результатов расчета сигнала ЯМР от подземной воды с учетом электропроводности среды. Получено хорошее согласие результатов расчета и эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1070063 СССР. Устройство для измерения параметров залежей подземных минералов / Семенов А. Г., Бурштейн А. И., Пусеп А. Ю. и Шилов М. Д. Оpubл. в БИ, 1988, № 13.
2. Шушаков О. А., Легченко А. В. Расчет сигнала протонного магнитного резонанса от подземной воды с учетом электропроводности среды // Геология и геофизика, 1994, № 3, с. 130—136.
3. Wait J. R. The magnetic dipole over the horizontally stratified earth // Canad. J. Phys., 1951, v. 29, № 6, p. 577—592.
4. Wait J. R. Mutual inductance on a two-layer earth // Canad. J. Phys., 1952, v. 30, № 4, p. 450—452.
5. Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм. М., Недра, 1987, 235 с.
6. Гельфанд И. С. Электромагнитное поле горизонтальной рамки в слоистой среде // Сб. статей по геофизическим методам разведки. М., Гостоптехиздат, 1955, с. 3—17.
7. Гасаненко Л. Б. Поле вертикального гармонического магнитного диполя над поверхностью многослойной структуры // Уч. зап. ЛГУ, 1959, № 278, с. 164—173.
8. Зверев Г. Н., Кусов В. А., Батанин В. А. Магнитный диполь в трехслойных проводящих средах // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1965, № 9, с. 63—72.
9. Ryu J., Morrison H. F., Ward S. H. Electromagnetic field about a loop source of current // Geophysics, 1970, v. 35, № 5, p. 862—897.
10. Великин А. Б., Франтов Г. С. Электромагнитные поля, применяемые в индуктивных методах электроразведки. Л., Гостоптехиздат, 1962, 352 с.
11. Дахнов В. Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. М., Недра, 1981, 344 с.
12. Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М., Недра, 1973, 256 с.
13. Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Л., Гостоптехиздат, 1937, 986 с.
14. А. с. 1540515 СССР. Устройство для измерения параметров водоносных подземных горизонтов / Легченко А. В., Семенов А. Г., Шилов М. Д. Оpubл. в БИ, 1990, № 4.

Рекомендована к печати
Ю. Н. Антоновым

Поступила в редакцию 3 февраля 1993 г.,
после доработки — 1 октября 1993 г.

O. A. Shushakov and A. V. Legchenko

GROUNDWATER PROTON MAGNETIC RESONANCE IN THE HORIZONTALLY STRATIFIED MEDIA OF DIFFERENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY

Groundwater proton magnetic resonance (PMR) was measured with a PMR-tomograph devised at the Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk. Unlike the standard procedure, both amplitude and phase of the PMR signal were measured. Experiments were carried out in the Altai region of Russia. Experimental data were compared with the data computed for horizontally stratified media. Borehole logs and vertical resistivity profiles were used for testing. There is fair agreement between computed and experimental data. It is established that the measurements of PMR amplitude and phase are not adequate for estimated groundwater salinity.

Nuclear magnetic resonance, electrical conductivity, groundwater