

О. А. Шушаков^{1, 2}*

Распределение по глубине водоотдачи и водопроницаемости подземных пластов по данным магнитно-резонансного зондирования

¹Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

*e-mail: shushako@kinetics.nsc.ru

Аннотация. С использованием калибровочных данных на льду Обского водохранилища методом магнитно-резонансного зондирования водоносных пластов в геомагнитном поле для скважины № 37 в районе Новосибирска измерена водоотдача 25% пласта на глубине от 20 до 40 м, получена оценка для коэффициентов релаксации на стенках пор: продольной - $1.6 \cdot 10^{-3}$ см/с, поперечной - $7.8 \cdot 10^{-3}$ см/с и локального градиента геомагнитного поля - $2.3 \cdot 10^{-2}$ Гаусс/см, водопроницаемость – 13 Дарси, которая согласуется с данными бурения (12.9 Дарси).

Ключевые слова: водоотдача, водопроницаемость, магнитно-резонансное зондирование

*О. А. Shushakov^{1, 2, *}*

Distribution by depth of water outlet and water permeability of aquifers according to magnetic-resonance sounding data

¹Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Using calibration data on the ice of the Ob reservoir by magnetic resonance sounding of aquifers in the geomagnetic field for well No. 37 in the Novosibirsk region, the water yield of 25% of the reservoir was measured at a depth of 20 to 40 m, an estimate was obtained for the relaxation coefficients on the pore walls: longitudinal - $1.6 \cdot 10^{-3}$ cm/s, transverse - $7.8 \cdot 10^{-3}$ cm/s and the local gradient of the geomagnetic field is $2.3 \cdot 10^{-2}$ Gauss/cm, water permeability – 13 Darcy, which is consistent with drilling data (12.9 Darcy).

Keywords: water outlet, water permeability, magnetic-resonance sounding

Введение

Водоотдача и водопроницаемость подземных пластов - важнейшие гидрогеологические параметры, позволяющие определять интенсивность водообмена и режим проектируемых и действующих источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. Водоотдачей называется отношение (в процентах) свободно стекающей воды (её называют также гравитационной или свободной) к общему объёму породы. Водопроницаемость характеризует способность породы пропускать воду при наличии перепада давления, измеряется в Дарси или мкм², зависит от размера пор, не только от пористости [1].

Методы и материалы

Магнитно-резонансное зондирование (МРЗ) подземных водоносных пластов - прямой метод детектирования подземной воды в горных породах на глу-

бине до 100 м. Амплитуда МРЗ пропорциональна спиновой намагниченности ядер (протонов), содержащихся в атомах водорода свободной воды, т.е. водоотдаче. Времена спада сигнала МРЗ (спиновой релаксации) зависят от размера пор, т.е. от водопроницаемости (рис. 1).

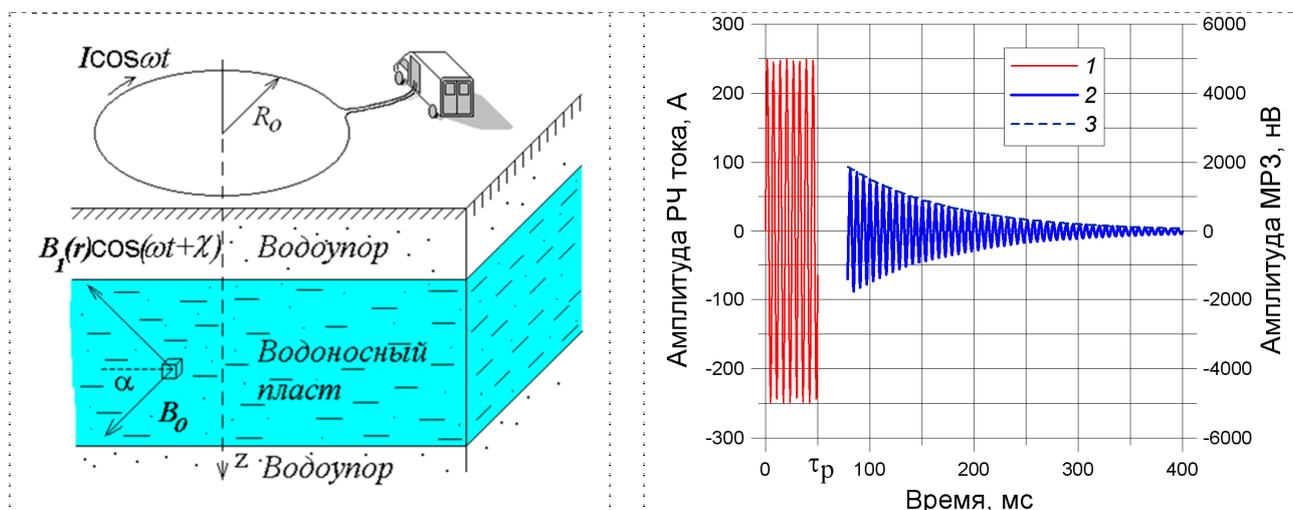


Рис. 1. Схема эксперимента и принцип регистрации МРЗ в геомагнитном поле: после воздействия радиочастотного импульса (1) длительностью τ_p с ларморовской частотой в геомагнитном поле намагниченность индуцирует сигнал МРЗ (2) с огибающей (3 - спад свободной индукции)

Для воды при $T = 293$ К и $B_0 = 6 \cdot 10^{-5}$ Тл (геомагнитном поле), возникает интегральная равновесная намагниченность $M_0 = 1.93 \cdot 10^{-7}$ Дж/(Тл·м³). Взаимодействие ядер с внешним магнитным полем $\vec{B} = \vec{B}_0 + 2\vec{B}_1 \cos \omega_0 t$, где $\vec{B}_0 \parallel z$, а $\vec{B}_1 \parallel x$, задаётся спин-гамильтонианом:

$$\hat{H}(t) = \hat{H}_0 + \hat{H}_1(t) = -\omega_0 \hat{I}_z - 2\omega_1 \hat{I}_x \cos \omega_0 t, \quad (1)$$

где \hat{I}_x, \hat{I}_z - компоненты оператора механического момента (спина) ядра, $\omega_0 = \gamma B_0$ - Ларморовская частота прецессии в геомагнитном поле, $\omega_1 = \gamma B_1$ - частота прецессии спина в поле B_1 (частота Раби), $\gamma = 2.6753 \cdot 10^8$ рад/(с·Тл) - гиромагнитное отношение для протона.

Усреднённый до второго порядка разложения гамильтониан во вращающейся вокруг \vec{B}_0 с частотой ω_0 системе координат

$$\begin{aligned} \bar{\bar{H}} &= (1/\tau_p) \int_0^{\tau_p} \tilde{H}(t) dt - (i/2\tau_p) \int_0^{\tau_p} dt_2 \int_0^{t_2} dt_1 \left[\tilde{H}(t_2), \tilde{H}(t_1) \right], \\ &= -\omega_1 \hat{I}_x + (\omega_1^2 / 4\omega_0) \hat{I}_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где $[AB] = AB - BA$ – коммутатор операторов А и В. Из (3) следует смещение резонансной частоты (сдвиг Блоха-Зигерта) [2-4]:

$$\Delta\omega = -\omega_1^2 / 4\omega_0. \quad (3)$$

Компоненты намагниченности во вращающейся системе координат с учётом сдвига Блоха-Зигерта:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_x &= \frac{\omega_1 \sin \Theta \cdot \Delta\omega}{\omega_{eff}^2} \cdot (1 - \cos \omega_{eff} \tau_p) \cdot M_0 \\ \tilde{M}_y &= \frac{\omega_1 \sin \Theta}{\omega_{eff}} \cdot \sin \omega_{eff} \tau_p \cdot M_0, \\ \omega_{eff} &= \sqrt{\omega_1^2 \sin^2 \Theta + \Delta\omega^2} \end{aligned} \quad (5)$$

где Θ - угол между \vec{B}_0 и \vec{B}_1 в лабораторной системе.

Экранирование радиочастотного поля полупространством $z > 0$ с однородной удельной проводимостью σ выражается следующим образом [5-7]:

$$B_{1z}(\mathbf{r}) = I_0 \cdot R_0 \int_0^\infty \frac{m^2}{m+u} e^{-uz} J_1(R_0 m) \cdot J_0(rm) dm \quad (6),$$

$$B_{1r}(\mathbf{r}) = I_0 \cdot R_0 \int_0^\infty \frac{mu}{m+u} e^{-uz} J_1(R_0 m) \cdot J_1(rm) dm \quad (7),$$

где R_0 – радиус антенны, $u = (m^2 - i\sigma\mu\omega)^{1/2}$, J_0 и J_1 – функции Бесселя.

Сигнал МРЗ сразу после возбуждающего импульса ($t=0$):

$$e(t=0) = (\omega / I_0) \int_V \left\{ \sqrt{\tilde{M}_x^2(\mathbf{r}) + \tilde{M}_y^2(\mathbf{r})} B_1^2(\mathbf{r}) \sin \Theta(\mathbf{r}) / |B_1(\mathbf{r})| \right\} d\mathbf{r} \quad (8)$$

Распределение свободной воды (водоотдачи) по глубине в горных породах определяется посредством обращения интегрального уравнения (8) [7].

Для калибровки метода МРЗ с учётом эффекта Блоха-Зигерта проводились эксперименты на льду Обского водохранилища (рис.2).

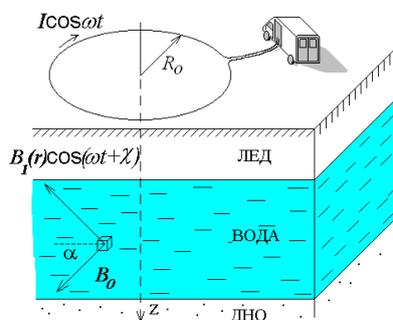


Рис. 2. Схема эксперимента по калибровке МРЗ на льду Обского водохранилища.

Толщина льда и глубина воды измерялись непосредственно путем бурения отверстий во льду, и составляли соответственно 1 ± 0.05 м и 11 ± 0.5 м. Антенна радиусом 50 м применялась для генерации радиочастотного поля и приема сигнала. Угол наклона геомагнитного поля α составлял 74° , частота протонного резонанса – 2517 Гц. Измеренное удельное сопротивление льда 500 ± 50 Ом·м, воды 50 ± 5 Ом·м и дна 50 ± 10 Ом·м.

Результаты

Рис. 3 и 4 демонстрируют хорошее согласие измеренных данных МРЗ и модельных расчётов амплитуды и фазы сигнала с учётом скин-экранирования и эффекта Блоха-Зигерта, в то время как без учёта эффекта Блоха-Зигерта расчёт и эксперимент отличаются в 3 раза для амплитуды и в 2 раза для фазы МРЗ.

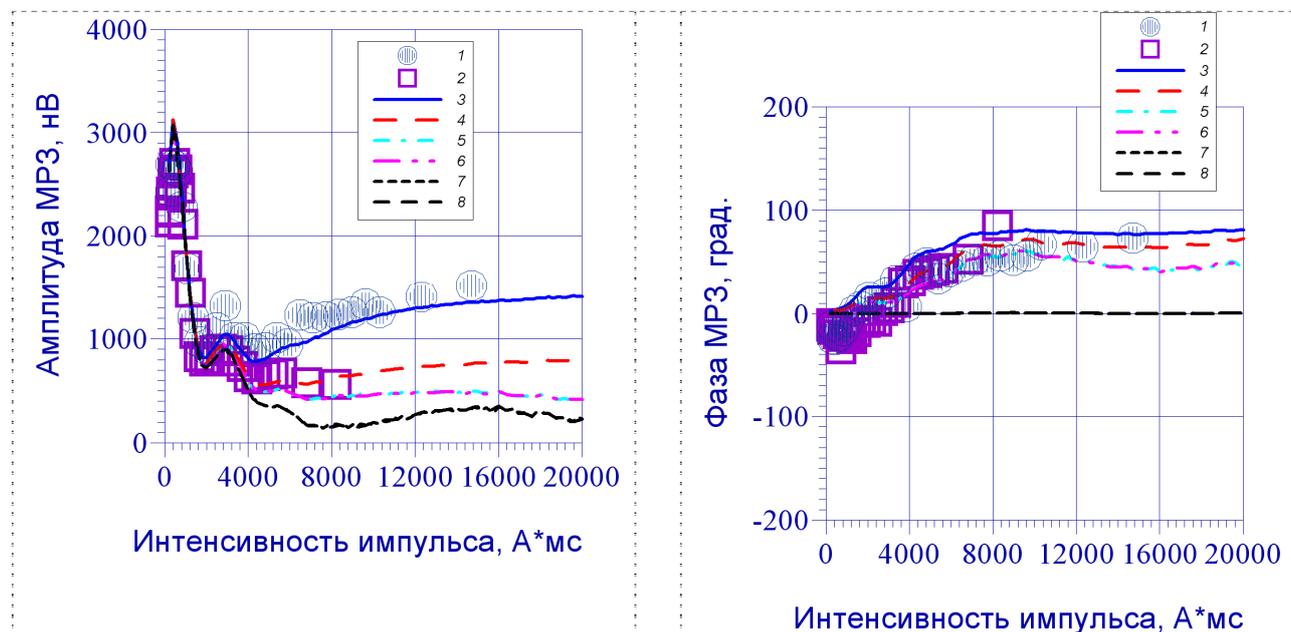


Рис 3. Амплитуда и фаза МРЗ от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс и 80 мс. Сравнение экспериментальных данных на льду Обского водохранилища с теоретическими расчетами. 1 - 40 мс, эксперимент. 2 - 80 мс, эксперимент. 3 - 40 мс, расчёт с учётом экранирования и Блоха-Зигерта. 4 - 80 мс, расчёт с учётом экранирования и Блоха-Зигерта. 5 - 40 мс, расчёт с экранированием без Блоха-Зигерта. 6 - 80 мс, расчёт с экранированием без Блоха-Зигерта. 7 - 40 мс, расчёт без Блоха-Зигерта и экранирования. 8 - 80 мс, расчёт без Блоха-Зигерта и экранирования.

На рис. 4 приведена зависимость содержания воды от глубины по данным калибровочных экспериментов. Расчёт с учётом эффекта Блоха-Зигерта даёт слой воды от 1 до 11 м с содержанием 100%, в то время как без учёта эффекта Блоха-Зигерта появляется несуществующий слой от 70 до 90 м.

На рис.5 показан пример зависимости водоотдачи от глубины по данным МРЗ в сравнении с данными бурения и каротажа для скважины №37, Новосибирск.

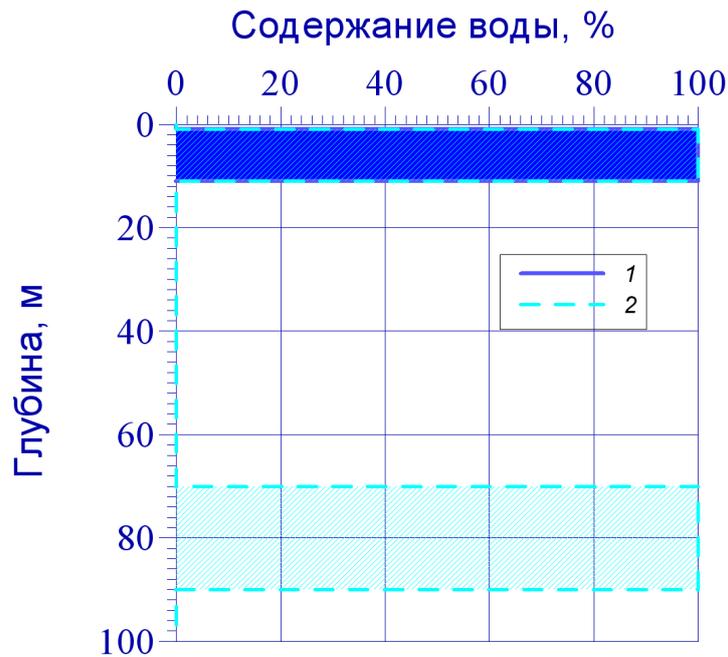


Рис. 4. Зависимость содержания воды от глубины по данным калибровочных экспериментов на льду Обского водохранилища: 1 – с учетом электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта (слой воды от 1 до 11 м с содержанием 100%). 2 – без учёта эффекта Блоха-Зигерта (слой от 1 до 11 м с содержанием воды 100% и несуществующий слой от 70 до 90 м).

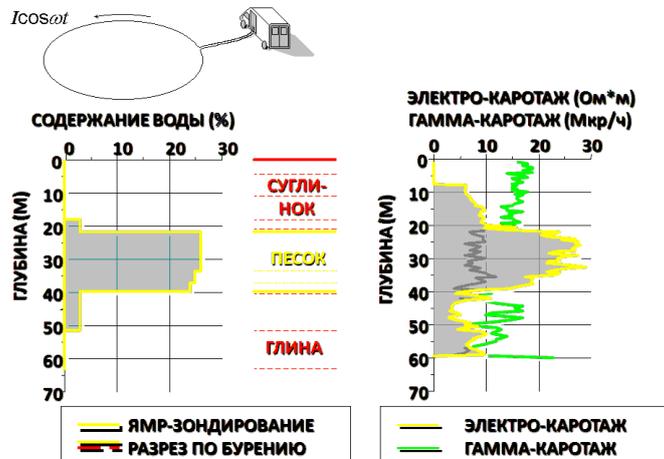


Рис. 5. Сравнение результатов МРЗ в геомагнитном поле с данными бурения и каротажа на примере скважины №37, Новосибирск.

Релаксация намагниченности \mathbf{M} , пропорциональной сигналу МРЗ, описывается уравнениями Блоха-Торри [8]:

$$\partial M_x / \partial t = D \Delta (M_x - M_{x0}) - M_x / T_{2bulk} + \gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H})_x \quad (9)$$

$$\partial M_y / \partial t = D \Delta (M_y - M_{y0}) - M_y / T_{2bulk} + \gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H})_y \quad (10)$$

$$\partial M_z / \partial t = D \Delta (M_z - M_{z0}) - M_z / T_{1bulk} + \gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H})_z \quad (11)$$

где D - коэффициент диффузии, T_{1bulk} и T_{2bulk} - времена продольной и поперечной релаксации воды в объёме.

Граничные условия характеризуют эффективность продольной (ρ_1) и поперечной (ρ_2) релаксации на стенках пор:

$$D (\mathbf{n} \cdot \nabla M'_x) + \rho_2 M'_x = 0 \quad (12)$$

$$D (\mathbf{n} \cdot \nabla M'_y) + \rho_2 M'_y = 0 \quad (13)$$

$$D (\mathbf{n} \cdot \nabla M'_z) + \rho_1 M'_z = 0 \quad (14)$$

При резонансе во вращающейся системе координат в интервалах между импульсами РЧ поля

$$\partial U / \partial t = D \Delta U - i \gamma G z U \quad (15)$$

где G – градиент поля, $U = M'_x + i M'_y$.

В предположении об однородности флюида в объёме пор и быстрой диффузии решение для времён релаксации имеет вид [9]:

$$1/T_1 = 1/T_{1bulk} + \rho_1 S/V \quad (16)$$

$$1/T_2 = 1/T_{2bulk} + \rho_2 S/V + (\gamma G t)^2 D / 12 \quad (17)$$

$$1/T_2^* = 1/T_{2bulk}^* + \rho_2 S/V + (\gamma G t)^2 D / 3 + \gamma G a, \quad (18)$$

где S/V – отношение площади к объёму пор, a – радиус зёрен породы.

На примере скважины №37 в Новосибирске исследовались времена спиновой релаксации с применением двухимпульсных последовательностей (рис. 6) [10].

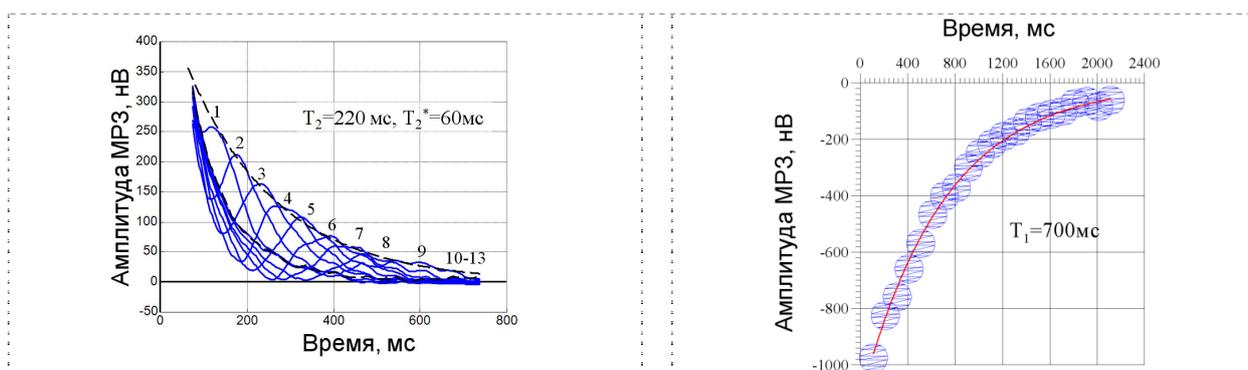


Рис. 6. Измеренный методом МРЗ сигнал свободной индукции, спинового эха и инверсии-восстановления на скважине №37, Новосибирск.

Для примера на рис. 6 методом спинового эха (первый импульс поворачивает намагниченность на 90° , второй – на 180°) было измерено время однородной спин-спиновой релаксации T_2 равное 220 мс, время спада свободной индукции T_2^* равное 60 мс, методом инверсии-восстановления (первый импульс поворачивает ядерную намагниченность на 180° , второй – на 90°) измерено время спин-решеточной релаксации T_1 , равное 700 мс. Используя измеренные ранее на льду Обского водохранилища времена продольной и поперечной релаксации свобод-

ной воды $T_{1\text{bulk}} = 1.4$ с, $T_{2\text{bulk}} = 0.9$ с, размер зёрен породы водоносного пласта по данным бурения $a = 2 \cdot 10^{-2}$ см и коэффициент диффузии воды $D = 1.3 \cdot 10^{-5}$ см²/с при 277 К, из (16) - (18) была получена оценка для коэффициентов релаксации на стенках пор $\rho_1 = 1.6 \cdot 10^{-3}$ см/с, $\rho_2 = 7.8 \cdot 10^{-3}$ см/с и градиента поля $G = 2.3 \cdot 10^{-2}$ Гаусс/см. При этом предполагалось, что радиус пор $r = a \cdot (3^{1/2}/\pi - 1/2)^{1/2} = 3 \cdot 10^{-3}$ см. По данным откачки скважины № 37 коэффициент водопроницаемости (англ. - transmissivity) $K_{\text{trans}} = 379$ м²/сут или 44 см²/с. Коэффициент фильтрации (средняя скорость фильтрации) $K_{\text{ф}} = K_{\text{trans}} / h = 1.29 \cdot 10^{-2}$ см/с, где $h = 34$ м - напор (высота столба воды в скважине от уровня грунтовых вод до дна пласта). По результатам бурения проведена оценка водопроницаемости (англ. - permeability) $K_{\text{perm}} = K_{\text{ф}} \cdot 10^3 = 12.9$ Дарси [1, с. 120]. С другой стороны, из определения коэффициента проницаемости, закона Пуазейля для цилиндрических трубок и определения пористости нетрудно получить

$$K_{\text{perm}} = \frac{r^2 \cdot \emptyset}{8 \cdot \tau^2}, \quad (19)$$

где r - радиус поры в виде цилиндрической трубки, \emptyset - эффективная пористость, τ - извилистость (удлинение пути фильтрации при наличии пор). В предположении радиуса пор $r = 4.5 \cdot 10^{-3}$ см, пористости $\emptyset = 25\%$ (по данным МРЗ), извилистости $\tau = \pi/2^{1/2} = 2.2$ (для плотной упаковки одинаковых шариков), водопроницаемость $K_{\text{perm}} = 13$ Дарси, которая согласуется с данными бурения.

Обсуждение

В нефтегазовой геофизике используется модель SDR [11], для оценки проницаемости (объясняется наличием горловин между порами)

$$K_{\text{perm}} = \text{const} \cdot T_1^2 \cdot \emptyset^4, \quad (20)$$

в отличие от классической оценки [12]

$$K_{\text{perm}} = \text{const} \cdot T_1^2 \cdot \emptyset^2. \quad (21)$$

(20) и (21) могут быть получены из (16) и (19) при зависимости радиуса пор и извилистости от пористости.

Заключение

Рекомендуется использовать магнитно-резонансное зондирование (МРЗ) в геомагнитном поле для оценки водоотдачи и водопроницаемости подземных пластов в комплексе гидрогеологических и гидрогеофизических исследований территорий и объектов.

Благодарности

Исследование удалось провести за счёт госзадания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шварцев С. Л. Общая гидрогеология. Учебн. для вузов. М.: Недра, 1996. 423 с.
2. Bloch F., Siegert A. Magnetic resonance for nonrotating fields // *Physical Review*. – 1940. – Vol.57. – P. 522-527.
3. Shushakov O. A., Maryasov A. G. Bloch-Siegert effect in magnetic-resonance sounding // *Applied magnetic resonance*. – 2016. – Vol.47. – P. 1021-1032.
4. Шушаков О. А. Электромагнитное экранирование и эффект Блоха-Зигерта в магнитно-резонансном зондировании // *Геология и геофизика*. – 2022. – Т. 63. – № 7. – С. 1005-1015.
5. Шушаков О. А., Легченко А. В. Расчёт сигнала протонного магнитного резонанса от подземной воды с учётом электропроводности среды // *Геология и геофизика*. – 1994. – Т. 35. – №3. – С. 130-136.
6. Shushakov O. A. Groundwater NMR in conductive water // *Geophysics*. – 1996. – Vol. 61. – №4. – P. 998-1006.
7. Legchenko A. V., Shushakov O. A. Inversion of surface NMR data // *Geophysics*. – 1998. – Vol. 63. – № 1. – P. 75-84.
8. Torrey R. C. Bloch Equations with Diffusion Terms // *Phys. Rev.* – 1956. – Vol. 104. – № 3. – P. 563-565.
9. Brownstein K., Tarr C. Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells // *Phys. Rev. A*. – 1979. – Vol. 19. – P. 2446–2453.
10. Shushakov O. A., Fomenko V. M. Surface-NMR relaxation and echo of aquifers in geomagnetic field // *Applied magnetic resonance*. – 2004. – Vol. 25. – P. 599-610.
11. Kenyon W. E., Day P. I., Straley C. and Willemsen J. F. Three-Part Study of NMR Longitudinal Relaxation Properties of Water-Saturated Sandstones // *SPE Formation Evaluation*. – 1988. – Vol. 3. – P. 622-636.
12. Seevers D. O. A Nuclear Magnetic Method for Determining the Permeability of Sandstones // *SPWLA 7th Annual Logging Symposium*. Tulsa. Oklahoma. 9-11 May 1966. Paper L.

© О. А. Шушаков, 2023