

Электромагнитное экранирование и эффект Блоха-Зигерта в магнитно-резонансном зондировании.

Шушаков О. А.

Аннотация

Были проведены калибровочные эксперименты магнитно-резонансного зондирования (МРЗ) на льду Обского водохранилища. Впервые проведён сравнительный количественный анализ вклада электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в сигнал магнитно-резонансного зондирования, исследована асимметрия вклада электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в сигнал магнитно-резонансного зондирования при расстройке от резонансной частоты. Результаты теоретических расчетов без учёта эффекта Блоха-Зигерта отличаются от экспериментальных данных при максимальной для экспериментальных данных интенсивности радиочастотного импульса примерно в 3 раза. В то же время, при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта результаты расчёта амплитуды и фазы сигнала наилучшим образом аппроксимируют полевые экспериментальные данные. На основании хорошего согласия между экспериментом и теоретическими расчетами с учетом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта продемонстрирована необходимость применения этой модели для решения прямой и обратной задачи магнитно-резонансного зондирования подземных водоносных пластов. Полученные результаты позволяют калибровать метод МРЗ и использовать его не только как индикатор подземной воды, но и как средство количественного измерения.

На примере исследований методом МРЗ в долине р. Эбро (Испания) продемонстрирована необходимость учёта эффекта Блоха-Зигерта в реальных полевых условиях. При учёте только электромагнитного экранирования (без учёта эффекта Блоха-Зигерта) амплитуда сигнала отличается примерно в 2 раза при максимальной для экспериментальных данных интенсивности импульса, фаза сигнала отличается в 12 раз при максимальной интенсивности импульса. Поэтому для аппроксимации экспериментальных данных с помощью модели без учёта эффекта Блоха-Зигерта в опубликованных ранее работах добавлялись слои на глубинах, близких к максимальной для данного типа антенны (примерно 50 м). Однако в реальности этих слоёв не существует, они появляются только как артефакт модели без учёта эффекта Блоха-Зигерта. Наилучшей аппроксимации экспериментальных данных удаётся добиться при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта.

Ключевые слова:

магнитный резонанс, геомагнитное поле, водоносные пласты, Блоха-Зигерта эффект.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ И ЭФФЕКТ БЛОХА-ЗИГЕРТА В МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОМ ЗОНДИРОВАНИИ.

О. А. Шушаков^{1,2}

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, ИХКГ СО РАН, ул. Институтская, 3, 630090 Новосибирск, Россия;*

² *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, 630090 Новосибирск, Россия.*

Ключевые слова: магнитный резонанс, геомагнитное поле, водоносные пласты, Блоха-Зигерта эффект.

Были проведены калибровочные эксперименты магнитно-резонансного зондирования (МРЗ) на льду Обского водохранилища. Впервые проведён сравнительный количественный анализ вклада электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в сигнал магнитно-резонансного зондирования, исследована асимметрия вклада электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в сигнал магнитно-резонансного зондирования при расстройке от резонансной частоты. Результаты теоретических расчетов без учёта эффекта Блоха-Зигерта отличаются от экспериментальных данных при максимальной для экспериментальных данных интенсивности радиочастотного импульса примерно в 3 раза. В то же время, при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта результаты расчёта амплитуды и фазы сигнала наилучшим образом аппроксимируют полевые экспериментальные данные. На основании хорошего согласия между экспериментом и теоретическими расчетами с учетом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта продемонстрирована необходимость применения этой модели для решения прямой и обратной задачи магнитно-резонансного зондирования подземных

водоносных пластов. Полученные результаты позволяют калибровать метод МРЗ и использовать его не только как индикатор подземной воды, но и как средство количественного измерения.

На примере исследований методом МРЗ в долине р. Эбро (Испания) продемонстрирована необходимость учёта эффекта Блоха-Зигерта в реальных полевых условиях. При учёте только электромагнитного экранирования (без учёта эффекта Блоха-Зигерта) амплитуда сигнала отличается примерно в 2 раза при максимальной для экспериментальных данных интенсивности импульса, фаза сигнала отличается в 12 раз при максимальной интенсивности импульса. Поэтому для аппроксимации экспериментальных данных с помощью модели без учёта эффекта Блоха-Зигерта в опубликованных ранее работах добавлялись слои на глубинах, близких к максимальной для данного типа антенны (примерно 50 м). Однако в реальности этих слоёв не существует, они появляются только как артефакт модели без учёта эффекта Блоха-Зигерта. Наилучшей аппроксимации экспериментальных данных удаётся добиться при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта.

Calibration experiments of magnetic resonance sounding (MRS) on the ice of the Ob reservoir were carried out. For the first time, a comparative quantitative analysis of the contribution of electromagnetic shielding and the Bloch-Siegert effect to the magnetic resonance sounding signal was carried out, and the asymmetry of the contribution of electromagnetic shielding and the Bloch-Siegert effect to the magnetic resonance sounding signal was investigated when detuning from the resonant frequency. The results of theoretical calculations without taking into account the Bloch-Siegert effect differ from the experimental data at the maximum intensity of the radio frequency pulse for the experimental data by about 3 times. At the same time, taking into account the interference of electromagnetic shielding and the Bloch-Siegert effect, the results of calculating the amplitude and phase of the signal best approximate the field experimental data. Based on a good agreement between the experiment and theoretical calculations, taking into account the interference of electromagnetic shielding and the Bloch-Siegert effect, the necessity of using this model to solve the direct and inverse problems of magnetic resonance sounding of underground aquifers is demonstrated. The results obtained allow us to calibrate the MRS method and use it not only as an indicator of underground water, but also as a means of quantitative measurement.

The necessity of taking into account the Bloch-Siegert effect in real field conditions is demonstrated by the example of MRS studies in the Ebro River valley (Spain). When taking into account only electromagnetic shielding (without taking into account the Bloch-Siegert effect), the signal amplitude differs by about 2 times at the maximum pulse intensity for experimental data, the signal phase differs by 12 times at the maximum pulse intensity. Therefore, to approximate the experimental data using the model without taking into account the Bloch-Siegert effect, layers were added in previously published works at depths close to the maximum for this type of antenna (approximately 50 m). However, in reality, these layers do not exist, they appear only as an artifact of the model without taking into account the Bloch-Siegert effect. The best approximation of the experimental data can be achieved by taking into account the interference of electromagnetic shielding and the Bloch-Siegert effect.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-резонансное зондирование (МРЗ) подземных водоносных пластов - быстрый, безопасный и недорогой метод дистанционного детектирования и характеристики подземных водоносных пластов при проведении комплекса геологоразведочных работ по изучению подземных вод. Уникальность метода МРЗ в том, что он является прямым, а не косвенным методом детектирования подземной воды, в отличие от известных геофизических методов электроразведки, сейсморазведки и других. Метод МРЗ позволяет детектировать залежи подземной воды в соответствующих геологических формациях на глубине до 100 м и более в зависимости от степени экранирования электромагнитного поля горными породами [Шушаков, Легченко, 1994 а, б; Shushakov, 1996 а]. Физический принцип основан на исследовании резонансного сигнала, создаваемого спиновой намагниченностью ядер (протонов), содержащихся в атомах водорода воды. Макроскопические участки подземных водоносных пластов исследуются посредством измерения ядерной магнитной релаксации протонов воды в порах и трещинах горных пород в геомагнитном поле. Возбуждение и прием сигнала МРЗ производится с помощью расположенной на поверхности антенны (Рис. 1) размерами порядка 100 метров (в форме круга или другой формы, например восьмерки, для уменьшения влияния внешних электромагнитных помех [Trushkin et al., 1995]). Частота магнитного резонанса в рассматриваемом случае составляет несколько килогерц, мертвое время аппаратуры – несколько миллисекунд (Рис. 2). Регистрируется только способная к гидродинамическому перемещению вода. Вода в очень мелких порах водоупорных пород

(например, в глинистых грунтах), химически связанная, кристаллизационная или замерзшая вода имеет более короткие времена спиновой релаксации и не регистрируется. Распределение концентрации воды по глубине определяется посредством обращения интегрального уравнения, содержащего модельные и измеренные зависимости сигнала МРЗ от интенсивности возбуждения [Legchenko, Shushakov, 1998]. Исследования скоростей спиновой релаксации позволяют получать информацию о микроструктуре пор и трещин и фильтрационных свойствах коллекторов [Shushakov, 1996 b; Shushakov, Fomenko, 2004], обнаруживать загрязнения подземных вод углеводородами [Фоменко и др., 2008].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

В состав воды (а также углеводородов и ряда других природных веществ) входят ядра атомов водорода 1H (протоны), обладающие собственным магнитным моментом. Эти магнитные ядра находятся во внешнем (геомагнитном) поле B_0 . Количество ядерных магнитных моментов, направленных вдоль внешнего поля и против него различно. Населенность спиновых подуровней определяется фактором Больцмана. Поэтому в равновесии возникает интегральная ядерная спиновая намагниченность образца $M_0(r)$, значение которой в равновесии определяется выражением [Abragam, 1961]

$$\vec{M}_0(r) = n(r) \frac{\gamma^2 \hbar^2 I \cdot (I + 1)}{3kT} \vec{B}_0 \quad (1),$$

где $n(r)$ - число ядерных магнитных моментов в единице объема, r - радиус-вектор его положения, $\gamma_H = 2.6753 \cdot 10^8$ рад/(с*Тл) - гиромагнитное отношение для протона, \hbar - постоянная Планка, $I = 1/2$ - спин протона, k - постоянная Больцмана, T - температура. Для воды при $T = 293$ К и $B_0 = 6 \cdot 10^{-5}$ Тл, $M_0 = 1.93 \cdot 10^{-7}$ Дж/(Тл*м³).

Если на образец, кроме постоянного B_0 действует линейно поляризованное радиочастотное (РЧ) магнитное поле, то суммарное внешнее магнитное поле взаимодействующее со спиновой намагниченностью записывается следующим образом:

$$B(r,t) = B_0 + 2B_1(r) \cdot \cos \omega t \quad (2).$$

Оператор энергии этого взаимодействия (оператор Гамильтона или гамильтониан) выражается следующим образом

$$\hat{H}(r, t) = \hat{H}_0 + \hat{H}_1(r, t) = -\hat{I} \cdot [\omega_0 + 2\omega_1(r) \cdot \cos \omega t], \quad (3)$$

где \hat{I} - вектор оператора механического момента (спина) ядра, $\omega_0 = \gamma B_0$ - частота прецессии вектора спиновой намагниченности в геомагнитном поле B_0 (частота Лармора или Зеемана), $\omega_1 = \gamma B_1$ - частота прецессии спиновой намагниченности в РЧ поле B_1 (частота Раби).

Гамильтониан $\hat{H}_1(t)$ преобразуется во вращающуюся вокруг поля B_0 (оси z) с частотой ω_0 систему координат $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ согласно формуле:

$$\tilde{H}_1(r, t) = (\omega - \omega_0)\hat{I}_z - \omega_{1\perp}(r) [\hat{I}_x + \hat{I}_x \cos 2\omega_0 t + \hat{I}_y \sin 2\omega_0 t]. \quad (4)$$

Применяя разложение Магнуса для среднего гамильтониана [Эрнст и др., 1990]

$$\bar{\tilde{H}}_1(r) = \bar{\tilde{H}}_1^{(1)}(r) + \bar{\tilde{H}}_1^{(2)}(r) + \dots \quad (5),$$

приходим к соотношениям

$$\bar{\tilde{H}}_1^{(1)}(r) = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} \tilde{H}_1(r, t) dt = (\omega - \omega_0)\hat{I}_z - \omega_{1\perp}(r) \cdot \hat{I}_x \quad (6),$$

$$\bar{\tilde{H}}_1^{(2)}(r) = -\frac{i}{2\tau_p} \int_0^{\tau_p} dt_2 \int_0^{t_2} dt_1 [\tilde{H}_1(r, t_2), \tilde{H}_1(r, t_1)] = \frac{\omega_{1\perp}^2}{4\omega_0} \hat{I}_z \quad (7),$$

где τ_p - длительность РЧ импульса (Рис. 2), $[\hat{A}, \hat{B}] = -[\hat{B}, \hat{A}]$ - коммутатор операторов \hat{A} и \hat{B} .

Из (7) следует смещение резонансной частоты, сдвиг Блоха-Зигерта [Bloch, Siegert, 1940]

$$\Delta\omega = -\frac{\omega_{1\perp}^2}{4\omega_0} \quad (8).$$

Если полупространство под антенной обладает конечной удельной электропроводностью σ , то переменное магнитное поле дважды экранируется за счет возникающих токов Фуко (скин-экранирование): один раз - при возбуждении, второй раз - при приеме сигнала МРЗ. В модели однородного полупространства радиальная и вертикальная компоненты переменного магнитного поля $B_1(r)$ для антенны в виде круга радиуса R_0 выражаются следующим образом [Шушаков, Легченко, 1994 а]:

$$B_{1z}(r) = I_0 R_0 \int_0^\infty \frac{m^2}{m+u} e^{-uZ} J_1(R_0 m) \cdot J_0(rm) dm \quad (9),$$

$$B_{1r}(r) = I_0 R_0 \int_0^\infty \frac{mu}{m+u} e^{-uZ} J_1(R_0 m) \cdot J_1(rm) dm \quad (10),$$

где $u = (m^2 - \sigma \mu \omega)^{1/2}$, J_0, J_1 - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка, μ - магнитная проницаемость. Более общая модель слоистой среды рассматривалась в [Шушаков, Легченко, 1994 б, Shushakov, 1996]. Другие виды антенн рассматривались в [Исаев и др., 1996].

При $B_1 \ll B_0$ начальная амплитуда сигнала МРЗ

$$e_0(q) = (\omega_0 / I_0) \int_V \tilde{M}_\perp(\vec{r}) B_{1\perp}^2(\vec{r}) / |B_{1\perp}(\vec{r})| dV(\vec{r}) \quad (11),$$

где I_0 - амплитуда тока, $q = I_0 \tau_p$ - интенсивность РЧ импульса тока в петле, $B_{1\perp}(r)$ - перпендикулярная полю B_0 компонента РЧ поля, $\tilde{M}_\perp(\vec{r})$ - перпендикулярная полю B_0 компонента намагниченности во вращающейся системе координат. Компоненты намагниченности $\tilde{M}_\perp(\vec{r})$ имеют следующий вид [Trushkin et al., 1993]:

$$\tilde{M}_x(\vec{r}) = \frac{\omega_1(r) \cdot \Delta\omega}{\omega_{eff}^2(r)} \cdot [1 - \cos \omega_{eff}(r) \tau_p] \cdot \vec{M}_0(\vec{r}) \quad (12),$$

$$\vec{M}_y(r) = \frac{\omega_1(r)}{\omega_{eff}(r)} \cdot \sin \omega_{eff}(r) \tau_p \cdot \vec{M}_0(r) \quad (13).$$

$\omega_{eff}(r) = \sqrt{\omega_1^2(r) + \Delta\omega^2}$ – эффективная частота прецессии в РЧ поле B_1 во вращающейся вместе с РЧ полем системе координат. Для антенны в форме круга

$$B_{1\perp}(r) = \sqrt{[B_r(r) \cdot \cos \phi]^2 + [B_r(r) \cdot \sin \phi \cdot \sin \alpha + B_z(r) \cdot \cos \alpha]^2} \quad (14),$$

где α - угол наклона геомагнитного поля по отношению к горизонтальной плоскости (наклонение), ϕ - аксиальный угол относительно вертикали (Рис.1).

Интегральное уравнение (11) используется для решения прямой и обратной задачи МРЗ [Legchenko, Shushakov, 1998].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки эффекта Блоха-Зигерта проводились эксперименты МРЗ на льду Обского водохранилища. Использовался прибор "Гидроскоп" производства ИХКГ СО РАН. На Рис.1 схематически показано расположение оборудования и антенны для магнитно-резонансного зондирования в геомагнитном поле. Толщина льда и глубина воды измерялись непосредственно путем бурения отверстий во льду, и составляли соответственно 1 ± 0.1 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 ($B_0 = 5.9114 \cdot 10^{-5}$ Тл). Удельное электрическое сопротивление воды 50 ± 5 Ом*м на месте экспериментов МРЗ определялось путём отбора проб воды через пробуренные отверстия во льду и прямого измерения удельного сопротивления с помощью предварительно откалиброванной ячейки. Удельное электрическое сопротивление льда 500 ± 50 Ом*м и дна 50 ± 10 Ом*м определялось методом ВЭЗ с учётом априорной информации об удельном электрическом сопротивлении воды и измеренного интервала глубин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис. 3 приведено сравнение с экспериментальными данными начальной амплитуды сигнала МРЗ (11) в зависимости от интенсивности РЧ импульса тока в антенне при длительности импульса τ_p 40мс, типичной для метода МРЗ, а также вдвое большей длительности 80 мс. Результаты теоретических расчетов совпадают между собой при длительности импульса 40мс и 80 мс в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта (8) и электромагнитного экранирования, а также при учёте только электромагнитного экранирования без учёта эффекта Блоха-Зигерта. Однако эти результаты расчётов сильно отличаются от экспериментальных данных при интенсивности РЧ импульса более 3000 А*мс. При максимальной для экспериментальных данных интенсивности РЧ импульса 15000 А*мс результаты расчётов без учёта эффекта Блоха-Зигерта отличаются от экспериментальных данных примерно в 3 раза. Кроме того, они не объясняют различие полевых экспериментальных данных при длительности 40мс и 80мс. В то же время, при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта результаты расчёта амплитуды сигнала МРЗ различны при длительности импульса 40мс и 80мс, и они наилучшим образом аппроксимируют полевые экспериментальные данные при длительности РЧ импульса 40мс и 80мс соответственно. Качественно это можно объяснить следующим образом: при длительности РЧ импульса 40мс при той же интенсивности РЧ импульса q (11) амплитуда тока и соответственно амплитуда РЧ поля (9, 10) в 2 раза больше, чем при длительности 80мс, поэтому эффект Блоха-Зигерта (8) при 40мс примерно в 4 раза больше, чем при 80мс. При этом эффект Блоха-Зигерта возрастает квадратично с увеличением интенсивности РЧ импульса, что наблюдается как в модельных расчётах, так и в экспериментальных данных. Точность измерения амплитуды сигнала МРЗ составляла $\pm 10-20$ нВ, что примерно соответствует размеру точек, обозначающих экспериментальные данные на рисунке.

На Рис. 4 приведена зависимость фазы сигнала МРЗ от интенсивности РЧ импульса тока в антенне при длительности импульса 40мс и 80мс. В отсутствие эффекта Блоха-Зигерта и электромагнитного экранирования фаза равна 0° . При учёте только электромагнитного экранирования без учёта эффекта Блоха-Зигерта из рисунка следует совпадение между собой теоретических расчетов при длительности импульса 40мс и 80 мс. Однако эти результаты расчётов отличаются от полевых экспериментальных данных. При учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта результаты расчёта фазы сигнала МРЗ наилучшим образом аппроксимируют полевые экспериментальные данные при длительности РЧ импульса 40мс и 80мс соответственно.

Точность измерения фазы сигнала МРЗ составляла $\pm 10\text{-}20^\circ$, что примерно соответствует размеру точек, обозначающих экспериментальные данные на рисунке.

На Рис. 5, 6 сравниваются амплитуды сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности импульса при расстройке от резонансной частоты ± 5 Гц и ± 10 Гц. В отсутствие эффекта Блоха-Зигерта (8) и электромагнитного экранирования результаты расчетов амплитуды при расстройке от резонансной частоты ± 5 Гц совпадают (Рис. 5). Совпадают также результаты расчетов амплитуды МРЗ в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта (8) и электромагнитного экранирования при расстройке ± 10 Гц (Рис. 6). Таким образом, амплитуда МРЗ симметрична при одинаковом изменении в большую и меньшую сторону от резонансной частоты в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта и электромагнитного экранирования. При учёте только электромагнитного экранирования в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта результаты расчетов амплитуды МРЗ при расстройке от резонансной частоты ± 5 Гц немного отличаются друг от друга, но сильно отличаются от экспериментальных данных. В то же время, при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта результаты расчёта амплитуды сигнала МРЗ хорошо аппроксимируют экспериментальные данные (Рис. 5). На Рис. 6 результаты расчёта амплитуды сигнала МРЗ с учётом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта хорошо аппроксимируют экспериментальные данные при расстройке ± 10 Гц.

На рис 7, 8 сравниваются фазы сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности импульса при расстройке от резонансной частоты ± 5 Гц и ± 10 Гц. Фаза МРЗ антисимметрична при одинаковом изменении в большую и меньшую сторону от резонансной частоты в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта и электромагнитного экранирования. При учёте только электромагнитного экранирования в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта результаты расчетов фазы МРЗ при одинаковой, но противоположной по направлению расстройке от резонансной частоты, немного отличаются друг от друга, но сильно отличаются от полевых экспериментальных данных. В то же время, при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта результаты расчёта фазы сигнала МРЗ хорошо аппроксимируют экспериментальные данные (Рис.7, 8).

Некоторое отличие теоретической модели с учётом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта на Рис. 3-8 от полевых экспериментальных данных находится в пределах точности измерений 10-20%. Разброс

полевых экспериментальных данных объясняется несколькими факторами. Во-первых - это внешний электромагнитный шум, который вносит ошибку в экспериментальные данные. Во-вторых - это ограниченная точность экспериментальной модели: с ограниченной точностью (порядка 10-20%) измерены толщина льда, глубина воды, удельное сопротивление. В-третьих, точность установки частоты прибором "Гидроскоп" при генерации и приёме сигнала МРЗ составляли ± 1 Гц. Следует отметить, что отличие экспериментальных данных от теоретической модели без учёта интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта значительно выходит за рамки экспериментальной погрешности. Например, как уже отмечалось ранее, отличие результатов расчёта без учёта эффекта Блоха-Зигерта от экспериментальных данных может быть до 3 раз при максимальной интенсивности РЧ импульса (см. напр. Рис.3), что гораздо больше погрешности измерений 10-20%.

На Рис. 9, 10 приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных для амплитуды и фазы сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности импульса при резонансе (расстройка 0 Гц). На Рис. 9 модельная кривая для воды от 1 до 11 м, полученная без учета эффекта Блоха-Зигерта примерно в 3 раза отличается от экспериментальных данных при максимальной интенсивности РЧ импульса. Результаты решения обратной задачи в виде гистограммы зависимости обводнённости (содержания воды в породе в %) от глубины показаны на рис 11. С учетом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в результате решения обратной задачи получается один слой воды на глубине от 1 до 11 м с содержанием воды 100%. Без учета эффекта Блоха-Зигерта в результате решения обратной задачи получаются два слоя: от 1 до 11 м с содержанием воды 100% и от 70 до 90 м с содержанием 100%. Хотя дно в этом месте не бурили, отсутствие спин-спиновой релаксации сигнала МРЗ с короткими временами (40-300 мс) [Shushakov Fomenko, 2004] однозначно указывает на то, что в пределах экспериментальной погрешности свободная вода в порах или трещинах горных пород отсутствует в заметной концентрации (5-10%) до глубины 80-90 м. На Рис. 12 в качестве примера приведены огибающие спада сигнала МРЗ (Рис. 2) при интенсивности РЧ импульса 432 А*мс и 14710 А*мс с длинными временами спин-спиновой релаксации порядка 900 мс. Таким образом, из Рис. 9 - 12 следует, что имеется не только значительное количественное несоответствие между экспериментальными данными и моделью магнитно-резонансного зондирования без учета интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта (до 3 раз, Рис.

9), но и качественное, а именно: появление несуществующего подземного моря на глубине 70-90 м.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ

Ниже приведён пример, показывающий необходимость учёта интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в реальных гидрогеофизических исследованиях с применением магнитно-резонансного зондирования подземных водоносных пластов. Исследование методом МРЗ проводилось в долине реки Эбро (Испания) двумя приборами: Гидроскоп производства Института химической кинетики и горения СО РАН и NUMIS PLUS производства IRIS Instruments (Франция). Результаты исследований с использованием модели без учёта интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта были опубликованы ранее [Plata, Rubio, 2005]. Для генерации РЧ поля и приема сигнала МРЗ использовались антенны в виде восьмерки, впервые использованной в [Trushkin et al., 1994]. Для прибора Гидроскоп использовалась антенна из двух кругов диаметром по 50 м, для прибора NUMIS - в виде двух квадратов 50x50 м [Plata, Rubio, 2005]. Литологический разрез точки Те-27 представлен в табл. 1. Геоэлектрический разрез: удельное сопротивление - 250 Ом*м на глубинах от 0 до 40 м от поверхности, 30 Ом*м - свыше 40 м. Угол наклона геомагнитного поля α составлял 55° , частота протонного резонанса – 1906 Гц ($B_0 = 4.4737 \cdot 10^{-5}$ Тл).

На Рис 13, 14 приведены амплитуды и фазы МРЗ для точки Те-27 в зависимости от интенсивности импульса, полученные прибором "Гидроскоп", и результаты их численной аппроксимации с учётом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта. Наилучшей аппроксимации экспериментальных данных удалось добиться при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта для водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%. Для сравнения приведены рассчитанные амплитуда и фаза МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования (без учёта эффекта Блоха-Зигерта) для водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%.

На Рис 15 приведён пример гистограммы зависимости обводнённости (содержания воды в породе в %) от глубины, полученной по данным Рис. 13, 14 для точки Те-27. На этой гистограмме два водоносных пласта: от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%. Для сравнения приведена гистограмма зависимости обводнённости от глубины, полученной аппроксимацией экспериментальных данных Рис. 13, 14 при учёте только электромагнитного экранирования (без учёта эффекта Блоха-Зигерта) в виде водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 49 до 50 м с содержанием воды 25%.

Следует отметить, что как на Рис. 13-15, так и на Рис. 9-11 наилучшей аппроксимации экспериментальных данных удалось добиться при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта. При учёте только электромагнитного экранирования (без учёта эффекта Блоха-Зигерта) амплитуда сигнала МРЗ на Рис. 13 отличается в 2 раза при максимальной для экспериментальных данных интенсивности импульса (примерно $12000 \text{ A} \cdot \text{мс}$), фаза сигнала МРЗ на Рис. 14 отличается в 12 раз при максимальной интенсивности импульса. Поэтому для аппроксимации экспериментальных данных с помощью модели без учёта эффекта Блоха-Зигерта приходится добавлять слои на глубинах, близких к максимальной для данного типа антенны. Для антенны в форме круга диаметром 100 м максимальная глубина МРЗ - примерно 100 м. Для антенны в виде восьмёрки из двух кругов диаметром по 50 м максимальная глубина МРЗ - примерно 50 м (Рис 15). Однако в реальности этих слоёв не существует, они появляются только как артефакт модели без учёта эффекта Блоха-Зигерта. Именно такие несуществующие слои получились в ранее опубликованной работе [Plata, Rubio, 2005] ввиду ошибочной интерпретации данных МРЗ без учёта эффекта Блоха-Зигерта. Похожая ситуация (не учитывается эффект Блоха-Зигерта, в результате чего при решении обратной задачи появляются несуществующие слои на глубинах, близких к максимальной) в подавляющем большинстве опубликованных ранее работ с использованием метода МРЗ, например [Yaramanci, Hertrich, 2007]. В современных работах с использованием метода МРЗ не учитывается эффект Блоха-Зигерта, например [Kemgang et al., 2019, Mazzilli et al., 2020].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен В. М. Фоменко, В. Д. Александрову за помощь в полевых экспериментах, J. L. Plata за полезное обсуждение опубликованных ранее результатов [Plata, Rubio, 2005], Ю. А. Дашевскому, В. Н. Глинских за полезное обсуждение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Данные калибровочных экспериментов МРЗ на льду Обского водохранилища хорошо аппроксимируются расчётами на основе модели, построенной с учётом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта.
2. Впервые проведён сравнительный количественный анализ вклада электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в сигнал МРЗ, исследована асимметрия вклада электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в сигнал МРЗ при расстройке от резонансной частоты.
3. На основе калибровочных экспериментов МРЗ на льду Обского водохранилища продемонстрирована необходимость учёта интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта при решении прямой и обратной задачи магнитно-резонансного зондирования подземных водоносных пластов.
4. Полученные результаты можно рассматривать как методику калибровки метода МРЗ, после которой МРЗ может служить не только индикатором подземной воды, но и средством измерения.
5. На примере исследований методом МРЗ в долине р. Эбро (Испания) продемонстрирована необходимость учёта эффекта Блоха-Зигерта в реальных полевых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрагам А. Ядерный магнетизм. М., Изд-во Иностран. лит., 1963, 552с.
- Исаев Г.А., Филатов В.В., Пусеп А.Ю., Сторожев А.В. О повышении эффективности поисков пресных вод на основе использования комплекса МПП-ЯМР // Геология и геофизика. 1996. т. 37(4). с 103-110.
- Фоменко В.М., Шушаков О.А., Кусковский В.С. Обнаружение загрязнений подземных вод углеводородами // Геология и геофизика, 2008, т. 49(3), с. 244-247.

- 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.
- Шушаков О.А., Легченко А.В. Протонный магнитный резонанс от подземной воды в горизонтально-слоистых средах разной электропроводности // Геология и геофизика, 1994, т. 35(10), с. 161-166.
- Эрнст Р., Боденхаузен Дж., Вокаун А. ЯМР в одном и двух измерениях. М., Мир, 1990, 711с.
- Bloch F., Siegert A. Magnetic resonance for nonrotating fields // Physical Review, 1940, v.57, p. 522-527.
- Kemgang D.T., Boucher M., Mvondo V.Y.E., Favreau G., Ngounou N.B., Yalo N., Goni I.B., Legchenko A. Contribution of time domain electromagnetic and magnetic resonance soundings to groundwater assessment at the margin of lake Chad basin, Cameroon // Journal of Applied Geophysics, 2019, v. 170, 103840.
- Legchenko A.V., Shushakov O.A. Inversion of surface NMR data // Geophysics, 1998, v. 63, No 1, p. 75-84.
- Mazzilli N, Chalikakis K, Carriere S,D, Legchenko A, Surface nuclear magnetic resonance monitoring reveals karst unsaturated zone recharge dynamics during a rain event // Water 2020, 12, 3183.
- Plata J.L., Rubio F.M. MRS experiment using Hydroscope instrument: some remarks // Presented at the EAGE 67th Conference & Exhibition - Madrid, Spain, 13 - 16 June 2005. - Z 99.
- Shushakov O.A. Groundwater NMR in conductive water // Geophysics, 1996, v. 61, No 4, p. 998-1006.
- Shushakov O.A. Non-invasive measurement of proton relaxation times in medium to coarse-grained sand aquifer // Magnetic Resonance Imaging, 1996, v. 14, No 7/8, p. 959-960.
- Shushakov O.A., Fomenko V.M. Surface-NMR relaxation and echo of aquifers in geomagnetic field // Applied magnetic resonance, 2004, v. 25, p. 599-610.
- Shushakov O.A., Maryasov A.G. Bloch-Siegert effect in magnetic-resonance sounding // Applied magnetic resonance, 2016, v.47, p. 1021-1032.
- Trushkin D.V., Shushakov O.A., Legchenko A.V. Modulation effects in non-drilling NMR in the Earth's field // Applied magnetic resonance, 1993, v. 5, p. 399-406.
- Trushkin D.V., Shushakov O.A., Legchenko A.V. The potential of a noise-reducing antenna for surface NMR groundwater surveys in the earth's magnetic field // Geophysical Prospecting, 1994, v. 42, p. 855-862.
- Yaramanci U., Hertrich M. Inversion of Magnetic Resonance Sounding data // Boletin Geologico y Minero, 2007, v. 118 (3), p. 473-488.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема полевого эксперимента по детектированию эффекта Блоха-Зигерта на льду Обского водохранилища. Применялась антенна радиусом $R_0=50\text{м}$. От 0 до 1 м – лед, от 1 до 11 м – вода. Угол наклона геомагнитного поля B_0 $\alpha=74^\circ$, частота радиочастотного поля 2517 Гц.

Рис. 2. Принцип регистрации МРЗ в геомагнитном поле. После воздействия импульса поля, осциллирующего с частотой, равной ларморовской частоте прецессии, свободно прецессирующая вокруг геомагнитного поля с ларморовской частотой намагниченность индуцирует сигнал МРЗ – спад свободной индукции, осциллирующий с ларморовской частотой и затухающий с постоянной времени - временем неоднородной спин-спиновой релаксации. Сигнал МРЗ регистрируется с некоторой задержкой («мертвое» время). 1 - амплитуда РЧ тока, 2 - амплитуда сигнала МРЗ от воды, 3 - огибающая сигнала МРЗ.

Рис 3. Амплитуда сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс и 80 мс. Сравнение полевых экспериментальных данных на льду Обского водохранилища с теоретическими расчетами при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта. 1 - 40 мс, эксперимент. 2 - 80 мс, эксперимент. 3 - 40 мс, расчёт с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 4 - 80 мс, расчёт с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 5 - 40 мс, расчёт с ЭМ экранированием без эффекта Блоха-Зигерта. 6 - 80 мс, расчёт с ЭМ экранированием без эффекта Блоха-Зигерта. 7 - 40 мс, расчёт без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования. 8 - 80 мс, расчёт без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования.

Рис. 4. Фаза сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс и 80 мс. Сравнение полевых экспериментальных данных на льду Обского водохранилища с теоретическими расчетами при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта. 1 - 40 мс, эксперимент. 2 - 80 мс, эксперимент. 3 - 40 мс, расчёт с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 4 - 80 мс, расчёт с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 5 - 40 мс, расчёт с ЭМ экранированием без эффекта Блоха-Зигерта. 6 - 80 мс, расчёт с ЭМ экранированием без эффекта Блоха-Зигерта. 7 - 40 мс, расчёт без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования. 8 - 80 мс, расчёт без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования.

Рис. 5. Амплитуда сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс при расстройке от резонансной частоты ± 5 Гц. 1 - эксперимент -5 Гц. 2 - эксперимент +5 Гц. 3 - расчёт -5 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 4 - расчёт +5 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 5 - расчёт -5 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 6 - расчёт +5 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 7 - расчёт -5 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования. 8 - расчёт +5 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования.

Рис. 6. Амплитуда сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс при расстройке от резонансной частоты ± 10 Гц. 1 - эксперимент -10 Гц. 2 - эксперимент +10 Гц. 3 - расчёт -10 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 4 - расчёт +10 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 5 - расчёт -10 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 6 - расчёт +10 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 7 - расчёт -10 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования. 8 - расчёт +10 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования.

Рис. 7. Фаза сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс при расстройке от резонансной частоты ± 5 Гц. 1 - эксперимент -5 Гц. 2 - эксперимент +5 Гц. 3 - расчёт -5 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 4 - расчёт +5 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 5 - расчёт -5 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 6 - расчёт +5 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 7 - расчёт -5 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования. 8 - расчёт +5 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования.

Рис. 8. Фаза сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс при расстройке от резонансной частоты ± 10 Гц. 1 - эксперимент -10 Гц. 2 - эксперимент +10 Гц. 3 - расчёт -10 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 4 - расчёт +10 Гц, с эффектом Блоха-Зигерта и ЭМ экранированием. 5 - расчёт -10 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 6 - расчёт +10 Гц, с ЭМ экранированием без учёта эффекта Блоха-Зигерта. 7 - расчёт -10 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования. 8 - расчёт +10 Гц, без эффекта Блоха-Зигерта и ЭМ экранирования.

Рис. 9. Результаты решения обратной задачи для амплитуды сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс при резонансе (на частоте 2517 Гц). 1 – полевые экспериментальные данные на льду Обского водохранилища. 2– результаты решения обратной задачи при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта. 3 – рассчитанная амплитуда МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования (в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта) для слоя воды от 1 до 11 м. 4 - рассчитанная амплитуда МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования для слоя воды от 70 до 90 м. 5 - результаты решения обратной задачи для амплитуды сигнала МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования (в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта) в виде двух слоёв воды: от 1 до 11 м и от 70 до 90 м.

Рис. 10. Результаты решения обратной задачи для фазы сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс при резонансе (на частоте 2517 Гц). 1 – полевые экспериментальные данные на льду Обского водохранилища. 2 – результаты решения обратной задачи при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта. 3 – рассчитанная фаза МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования (в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта) для слоя воды от 1 до 11 м. 4 - рассчитанная фаза МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования для слоя воды от 70 до 90 м. 5 - результаты решения обратной задачи для фазы сигнала МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования (в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта) в виде двух слоёв воды: от 1 до 11 м и от 70 до 90 м.

Рис. 11. Результаты решения обратной задачи в виде гистограммы зависимости обводненности (содержания воды в %) от глубины. 1 – результаты решения обратной задачи с учетом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в виде слоя воды от 1 до 11м с содержанием 100%. 2 – результаты решения обратной задачи с учётом только электромагнитного экранирования (в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта) в виде двух слоёв: от 1 до 11 м и от 70 до 90 м с содержанием воды 100%. По результатам измерений сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс при резонансе (на частоте 2517 Гц) на льду Обского водохранилища. Измеренная независимо толщина льда - от 0 до 1 м, воды – от 1 до 11 м. Сигнала МРЗ от подземной воды не наблюдалось (см. Рис. 12).

Рис. 12. Пример огибающих спада сигнала МРЗ (Рис. 2) при резонансе (частота 2517 Гц) при интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс. 1 - 432 А*мс и 2 - 14710

A *мс, измеренных на льду Обского водохранилища. 3 - аппроксимация $2998 \cdot \exp(-t / 905)$ нВ, 4 - $1739 \cdot \exp(-t / 850)$ нВ.

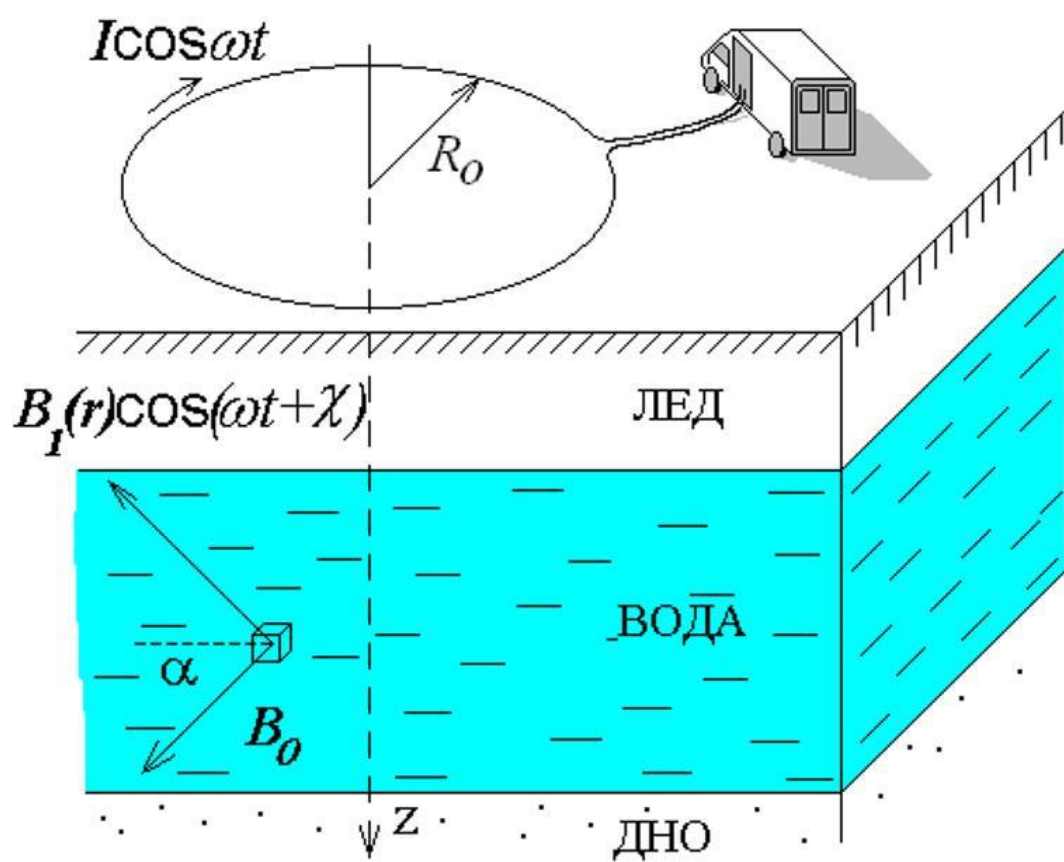
Рис. 13. Пример аппроксимации экспериментальных данных для амплитуды сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс. 1 – полевые экспериментальные данные для точки Те-27 в долине реки Эбро (Испания). 2– аппроксимация экспериментальных данных при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта для водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%. 3 – рассчитанная амплитуда МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования (без учёта эффекта Блоха-Зигерта) для водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%. 4 – электромагнитные помехи, измеренные на резонансной частоте антенной в виде восьмёрки из двух кругов диаметром по 50 м для точки Те-27 в долине реки Эбро (Испания).

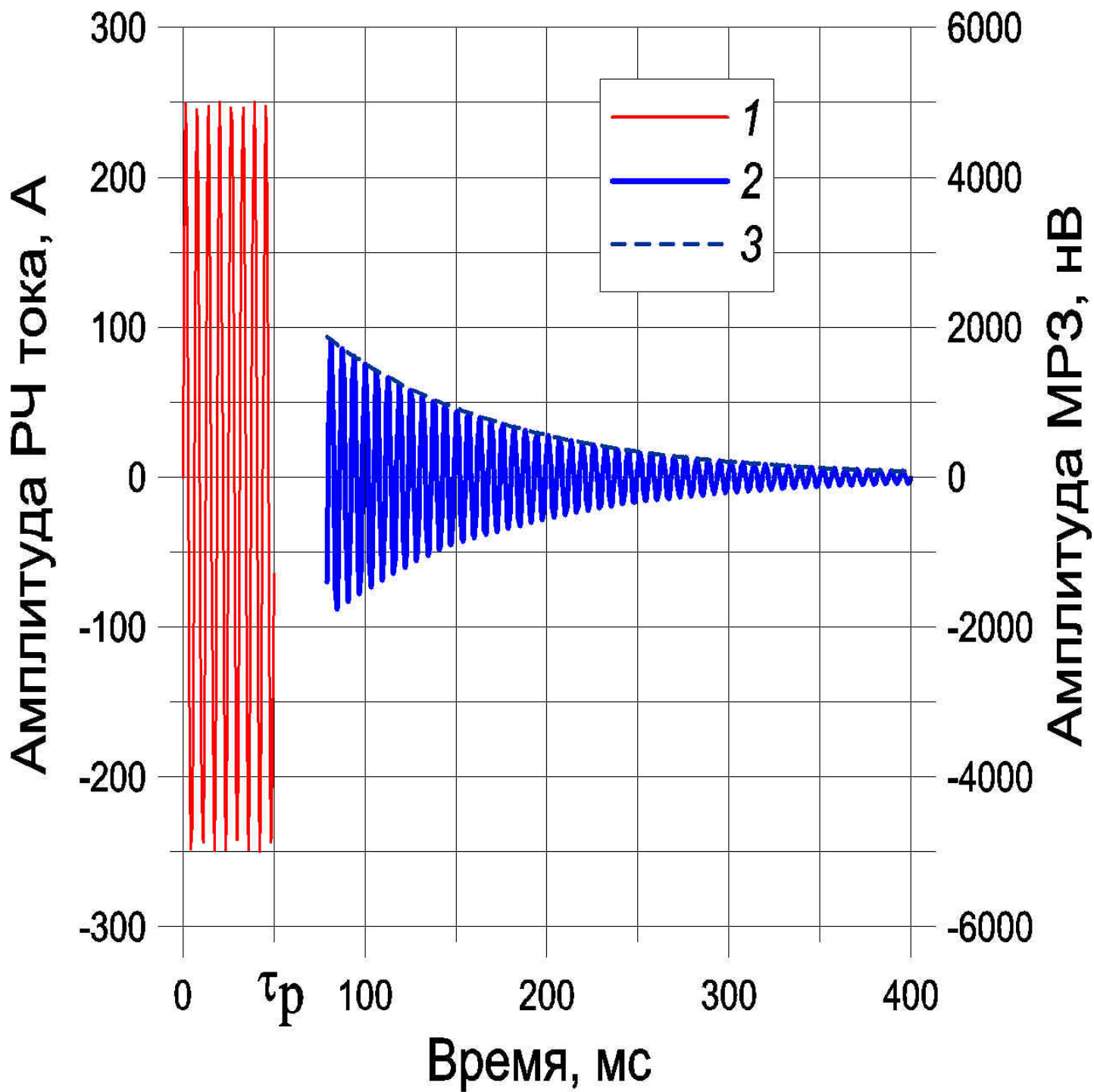
Рис. 14. Пример аппроксимации экспериментальных данных для фазы сигнала МРЗ в зависимости от интенсивности РЧ импульса длительностью 40 мс. 1 – полевые экспериментальные данные для точки Те-27 в долине реки Эбро (Испания). 2– аппроксимация экспериментальных данных при учёте интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта для водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%. 3 – рассчитанная фаза МРЗ при учёте только электромагнитного экранирования (без учёта эффекта Блоха-Зигерта) для водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%.

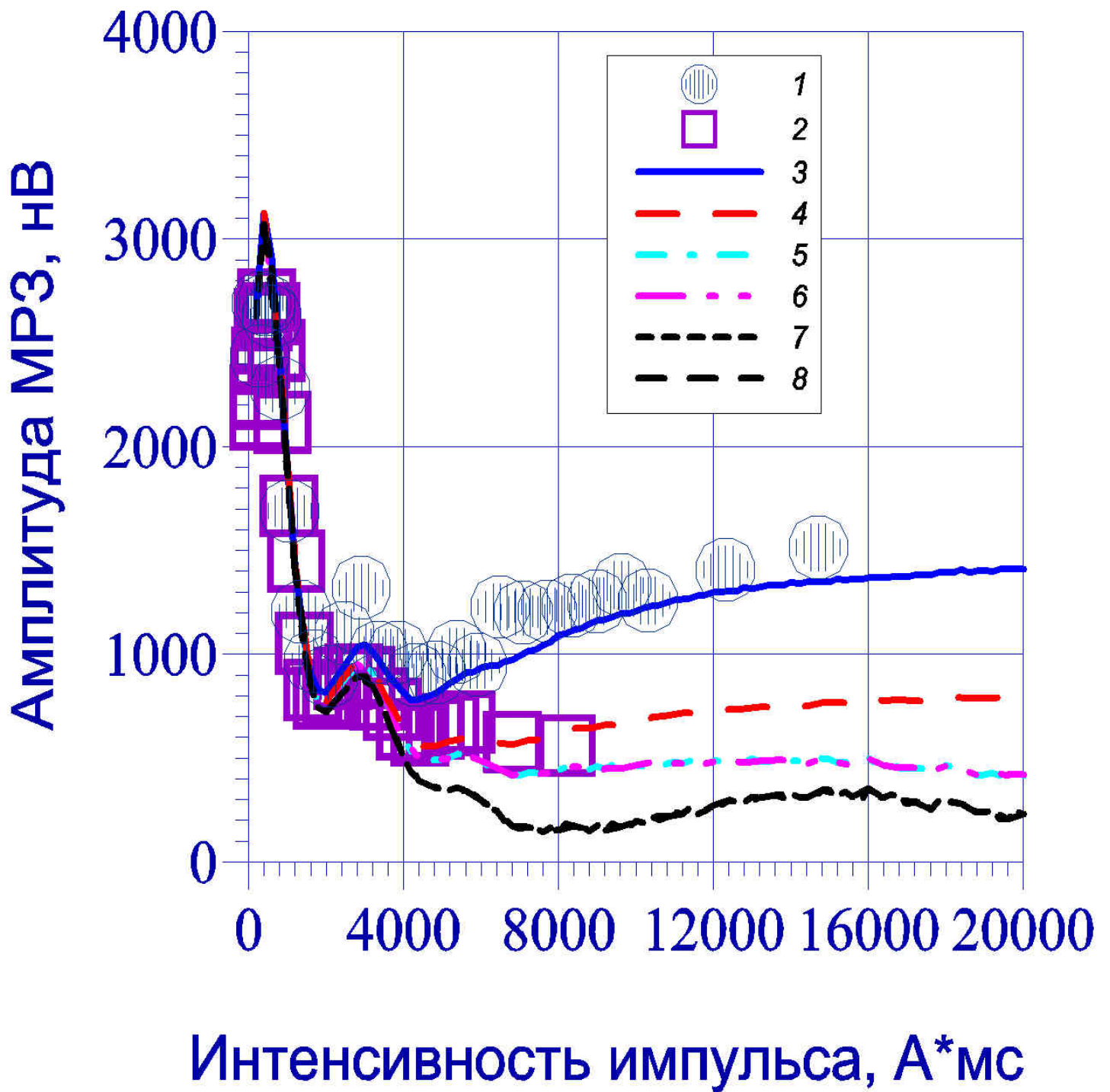
Рис. 15. Пример решения обратной задачи в виде гистограммы зависимости обводненности (содержания воды в %) от глубины для точки Те-27 в долине реки Эбро (Испания). 1 – решение обратной задачи с учетом интерференции электромагнитного экранирования и эффекта Блоха-Зигерта в виде водоносных пластов от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 14 до 50 м с содержанием воды 4%. 2 – результаты решения обратной задачи с учётом только электромагнитного экранирования (в отсутствие эффекта Блоха-Зигерта) в виде двух слоёв: от 1 до 14 м с содержанием воды 19% и от 40 до 50 м с содержанием воды 25%. 3 – максимальная глубина зондирования для данного типа антенны в виде восьмёрки из двух кругов диаметром по 50 м.

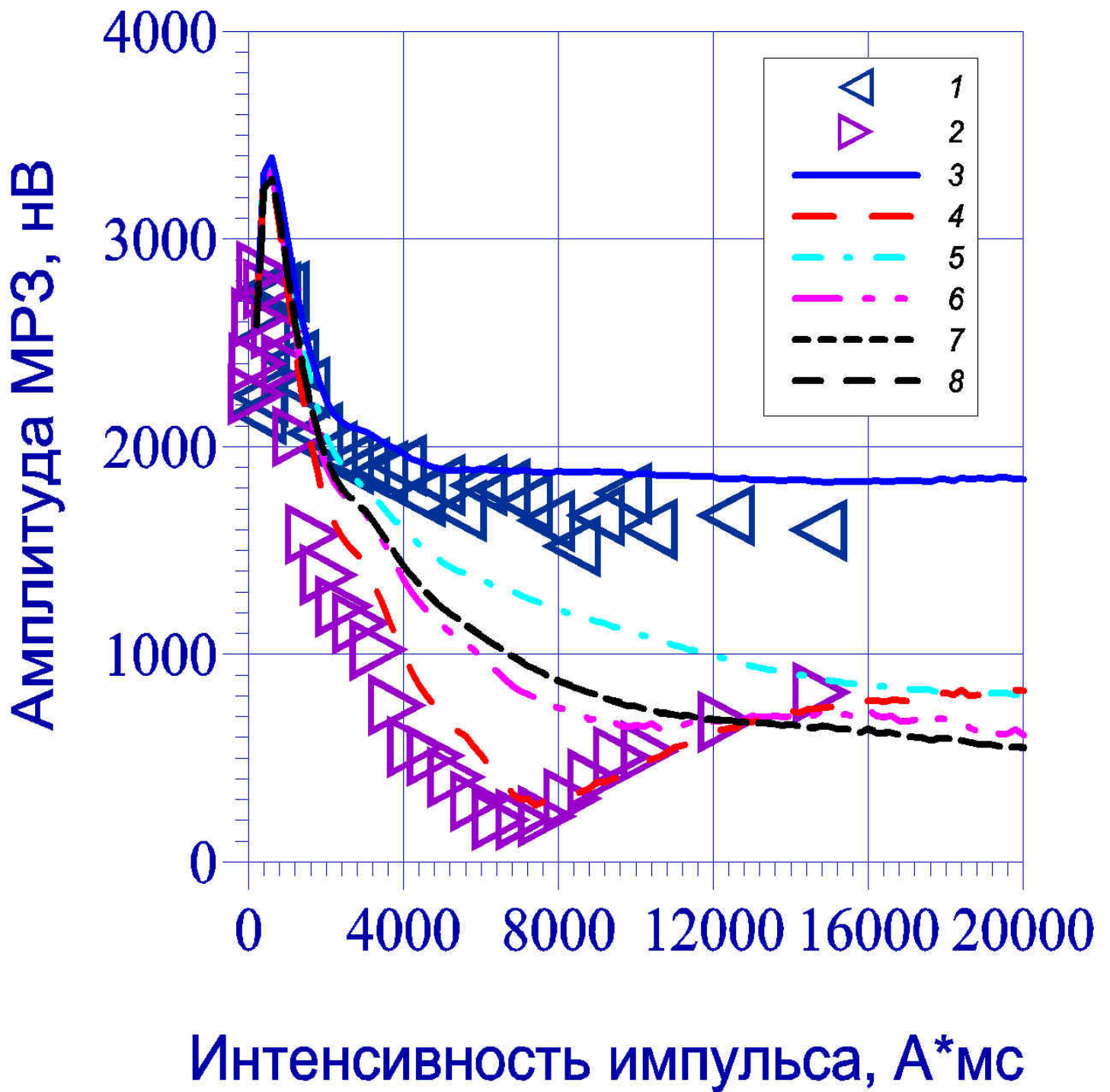
Таблица 1

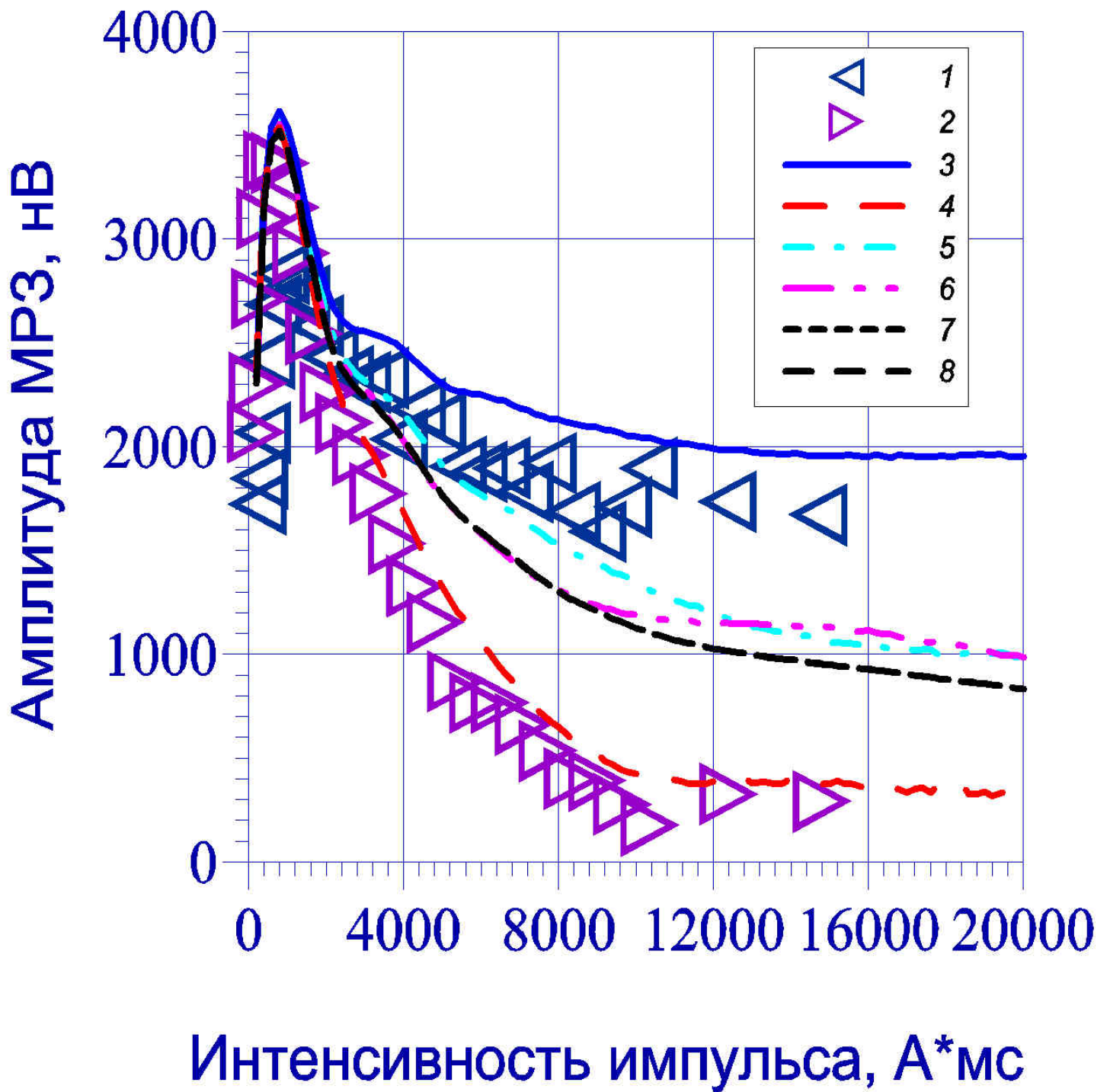
Глубина (м)	Литология	Возраст	Комментарий
0-1	Глина	Четвертичный	Водоупорный пласт
1-14	Песчаник	Четвертичный	Водоносный горизонт
14-50	Мергель с гравием	Плиоцен	Слабоводоносный горизонт
50-105	Мергель	Плиоцен	Водоупорный пласт

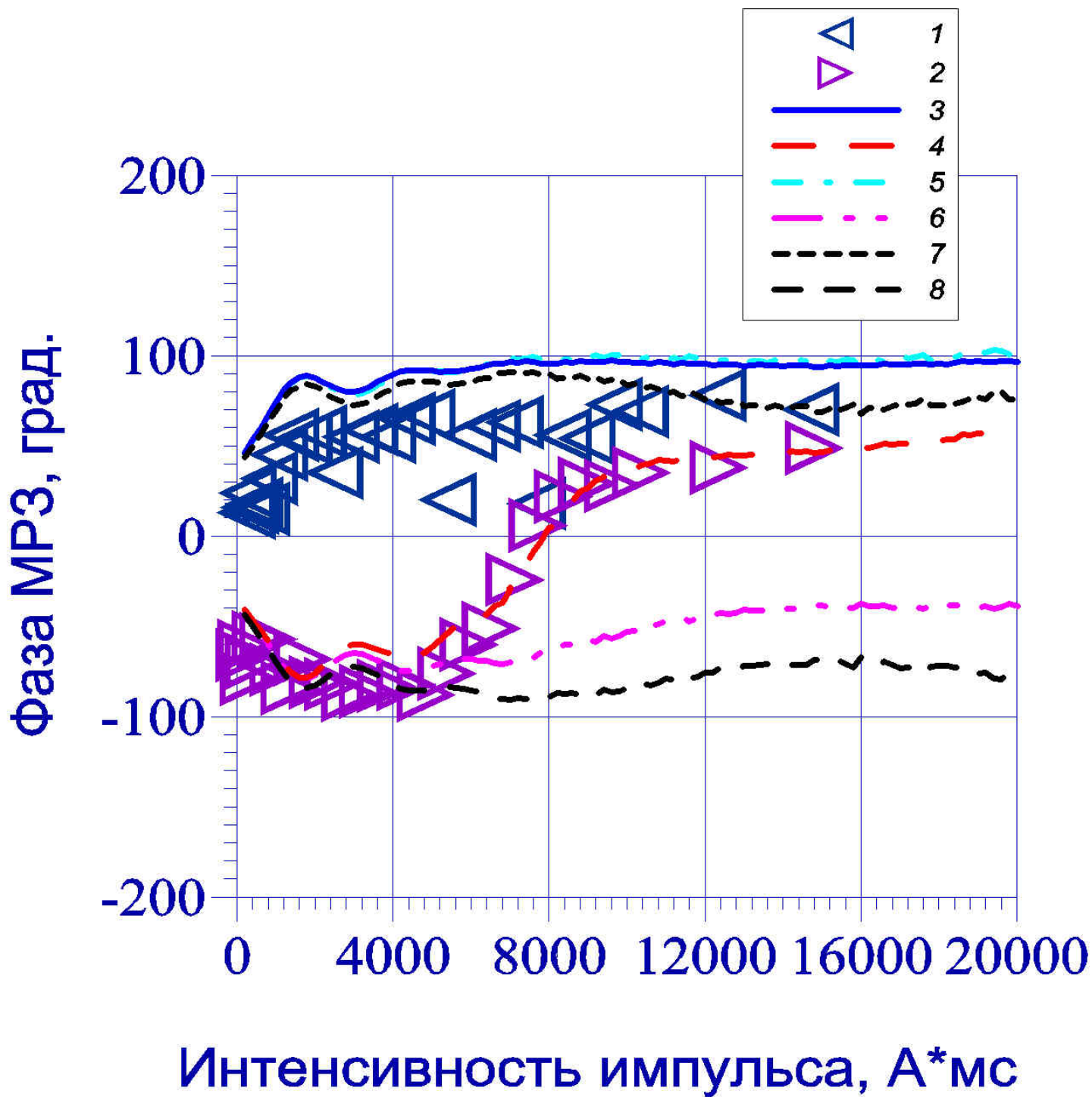


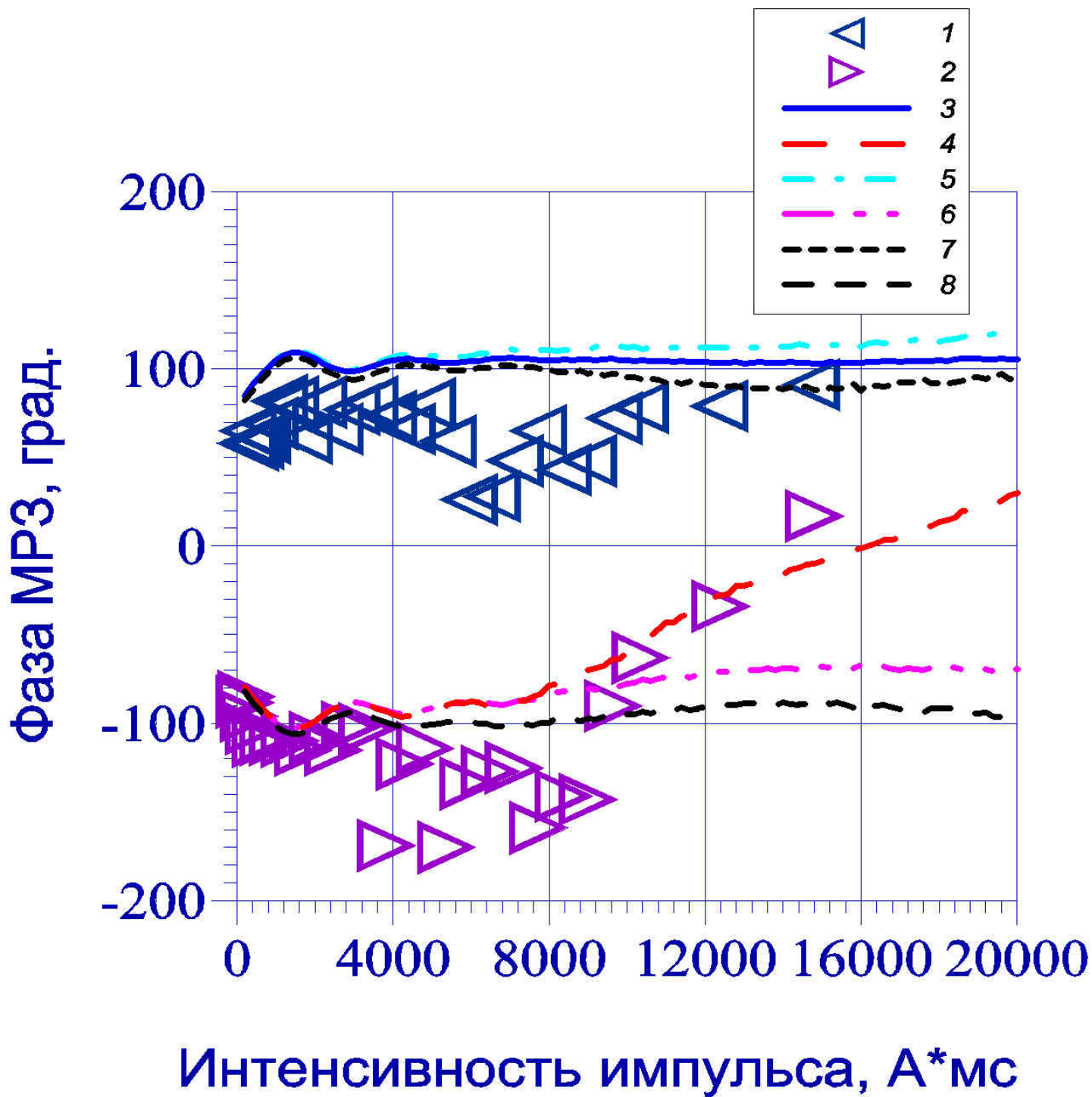


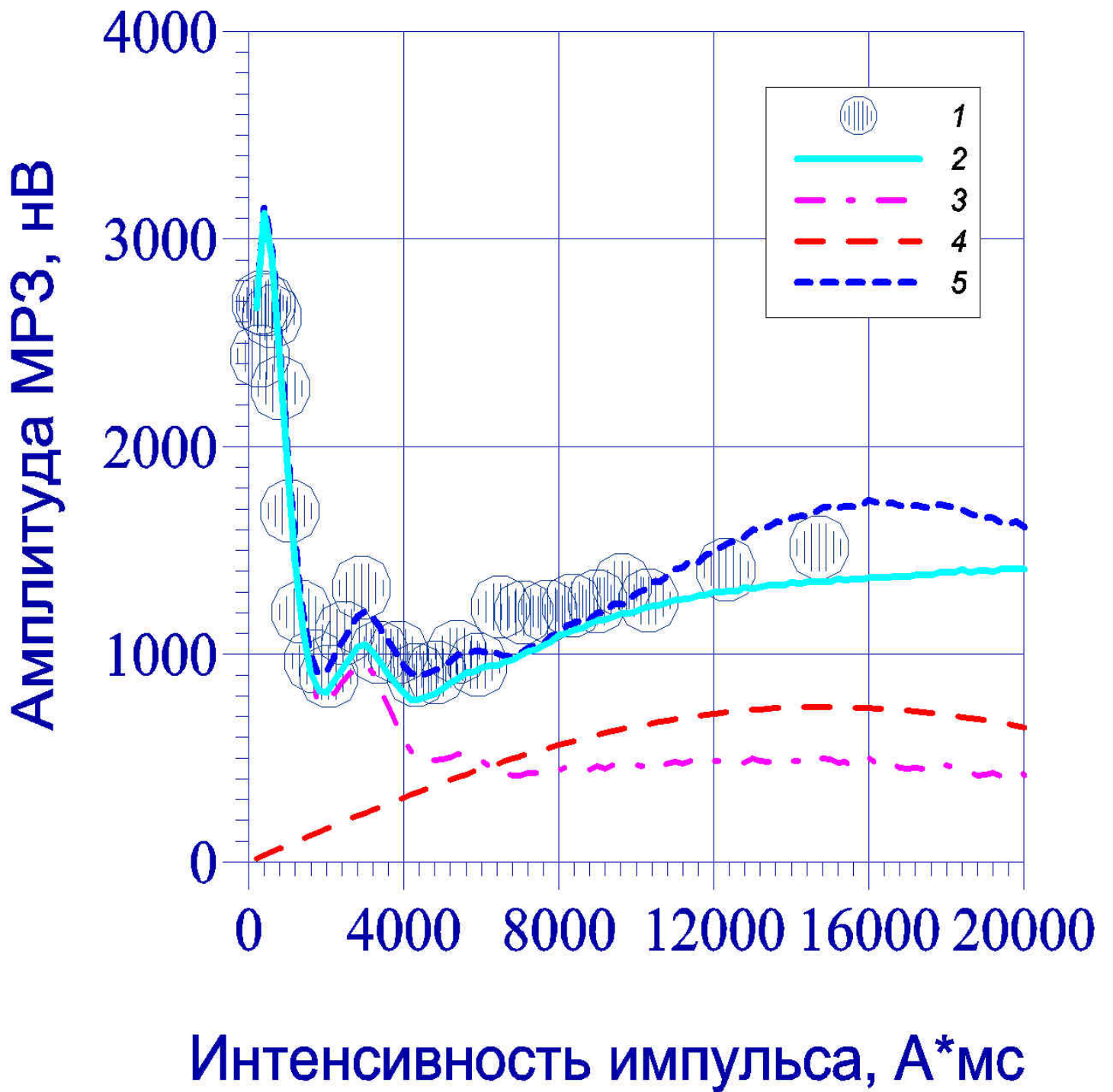


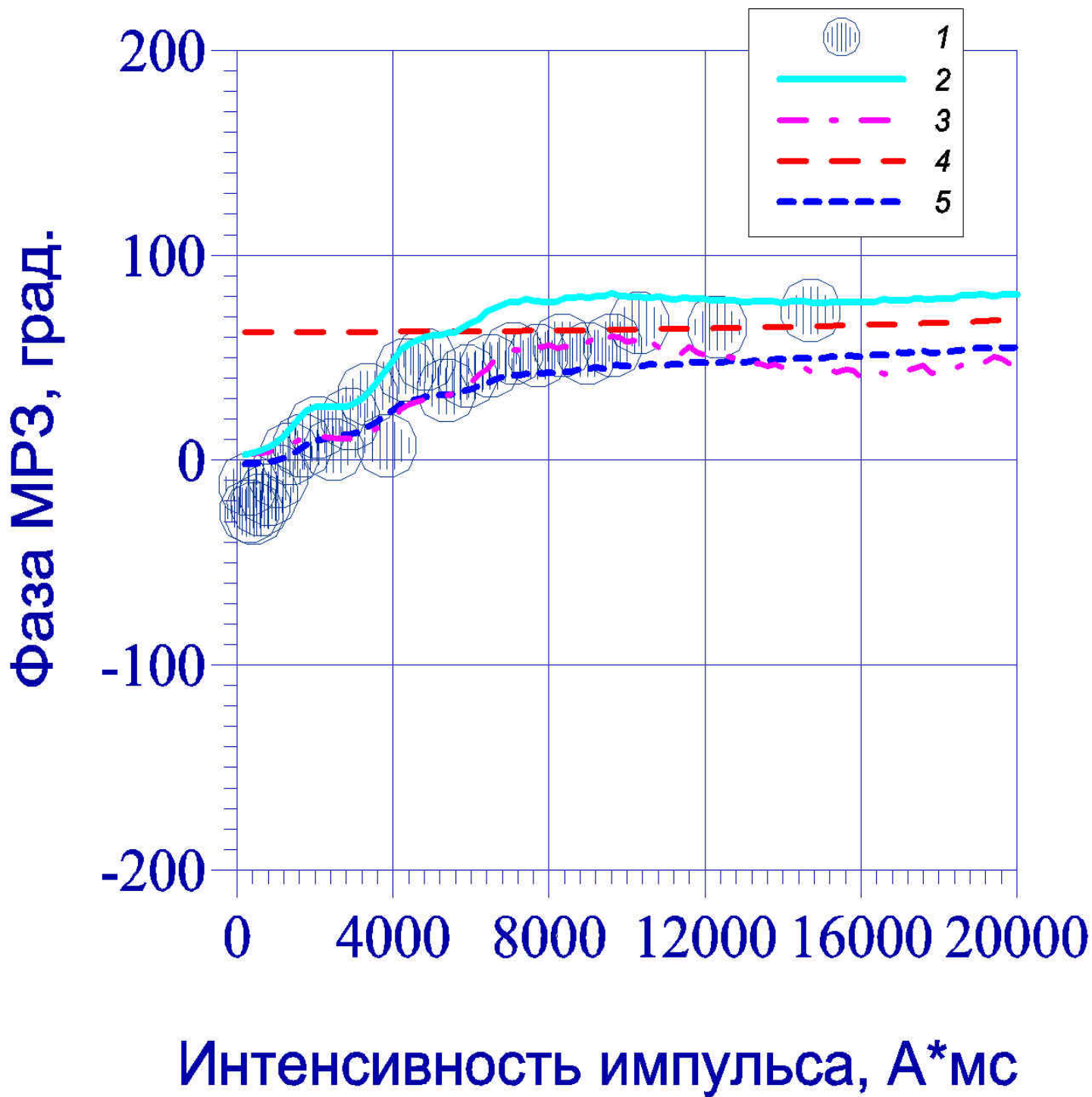








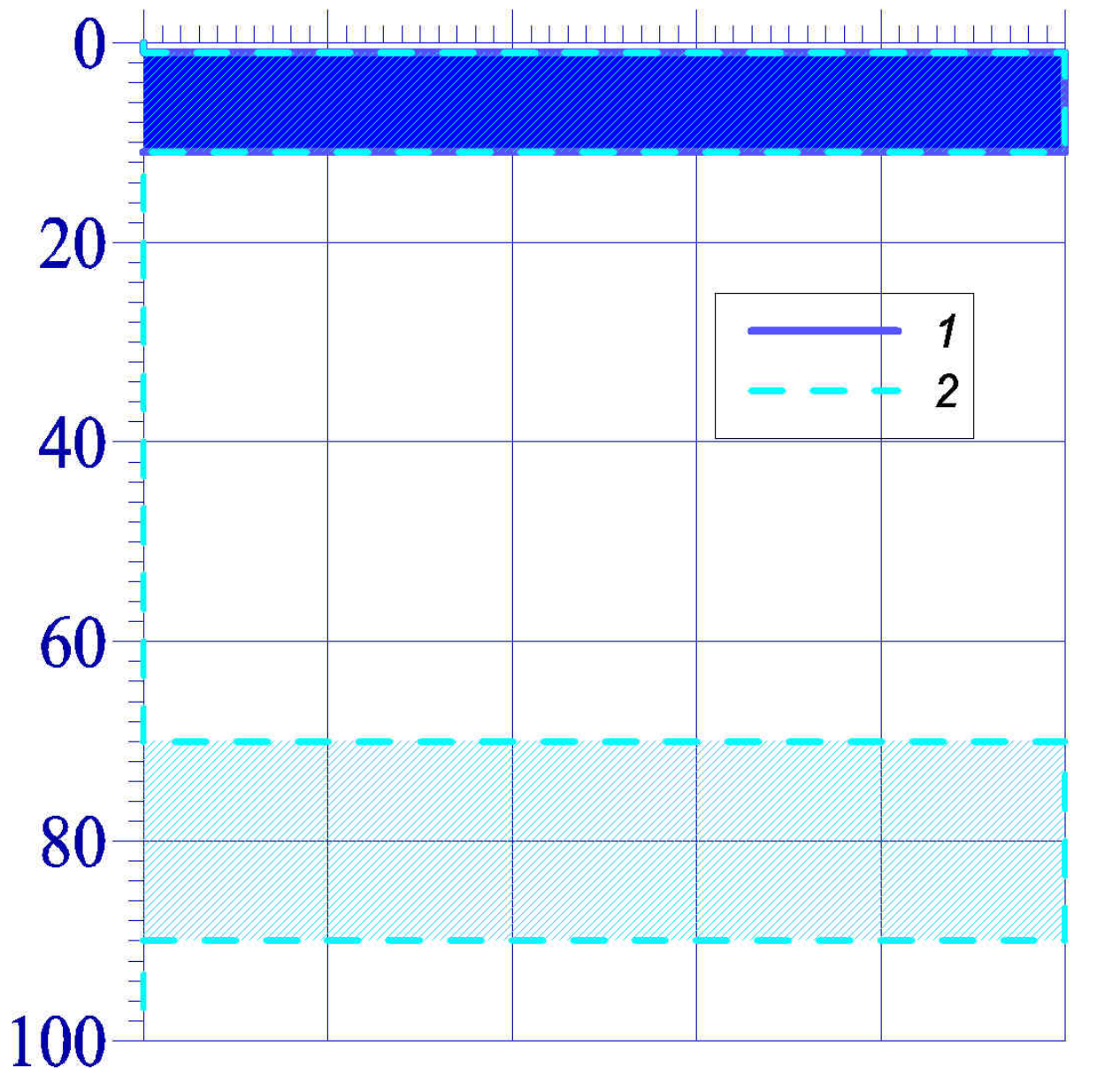


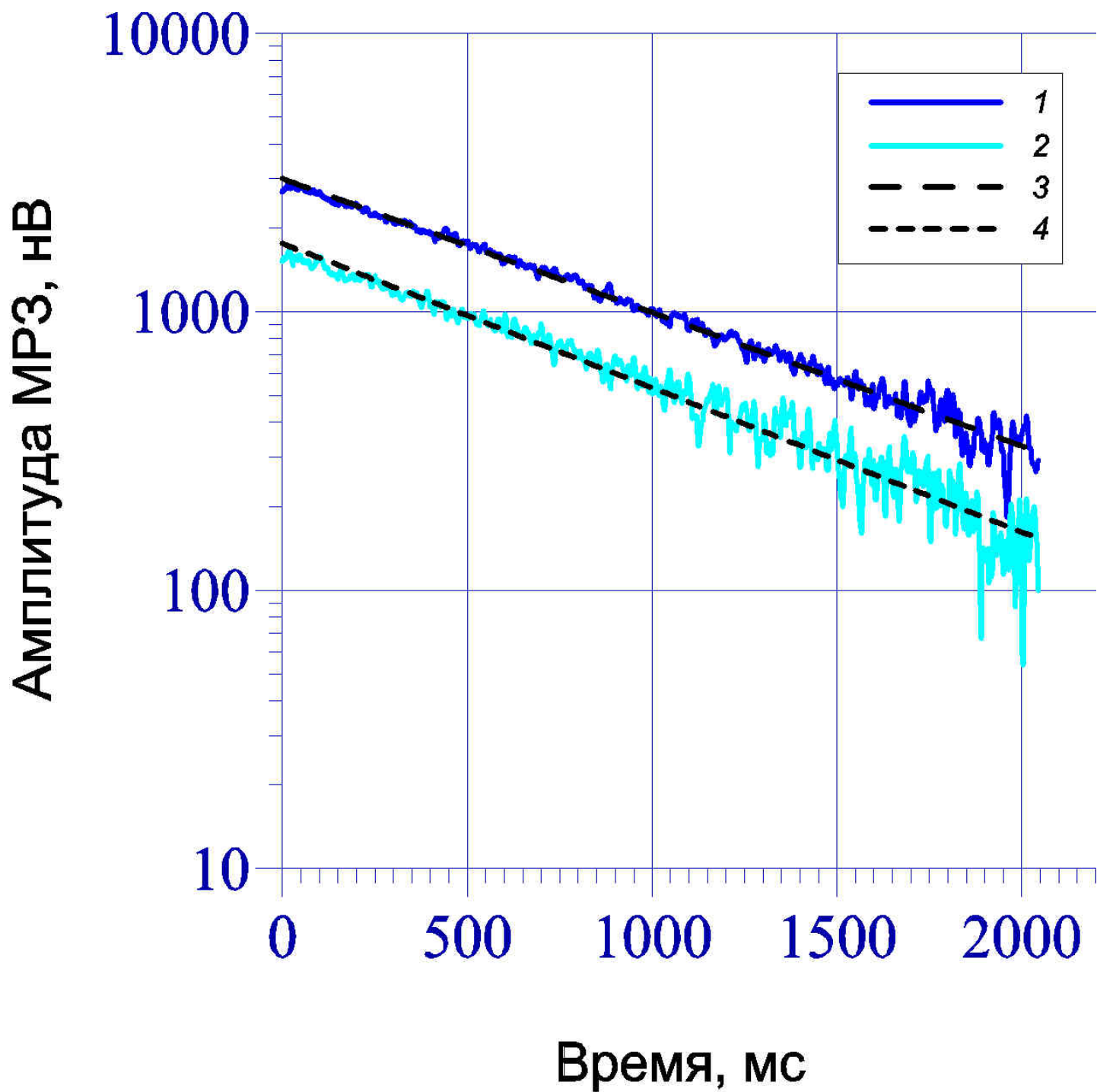


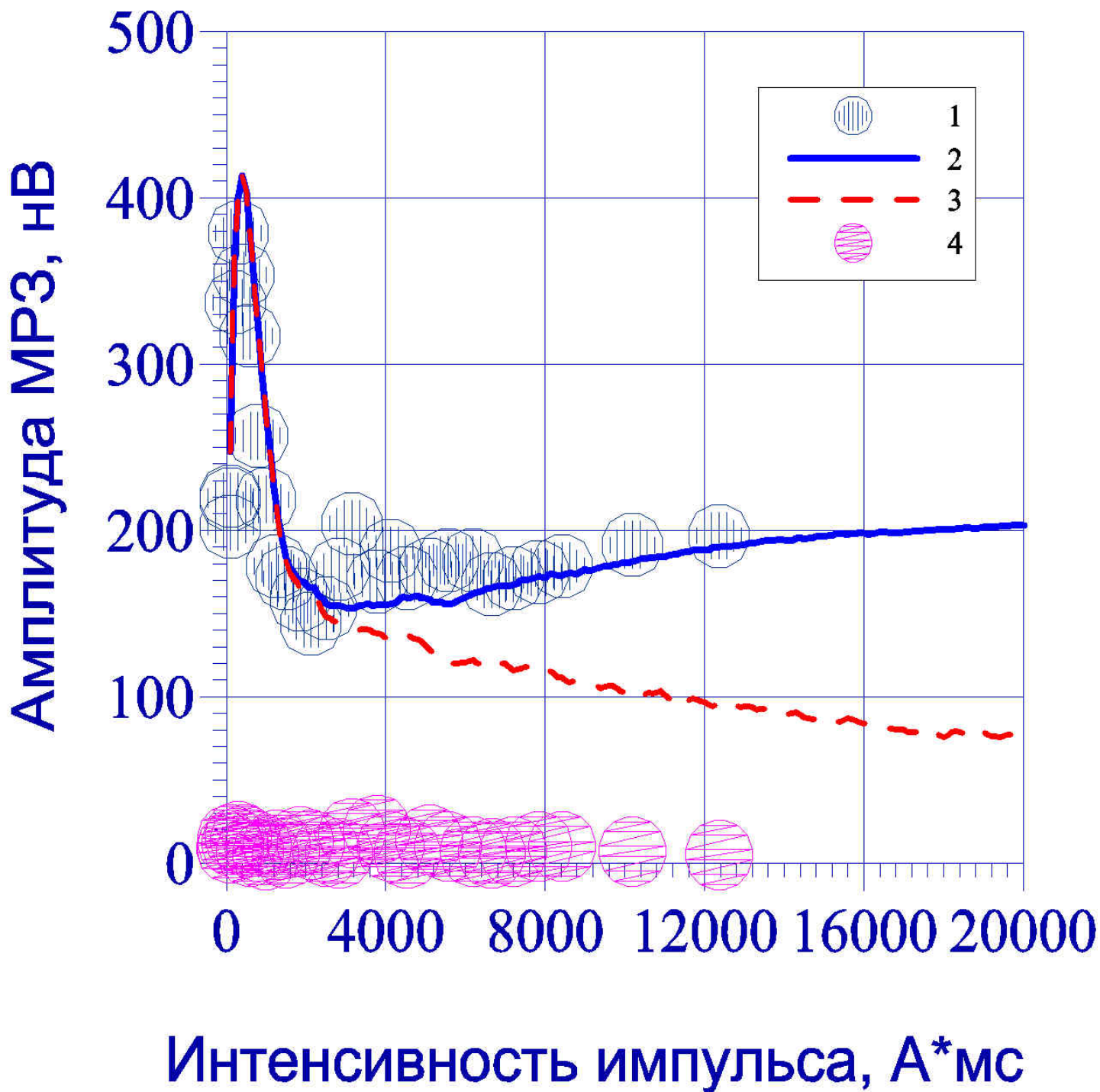
Содержание воды, %

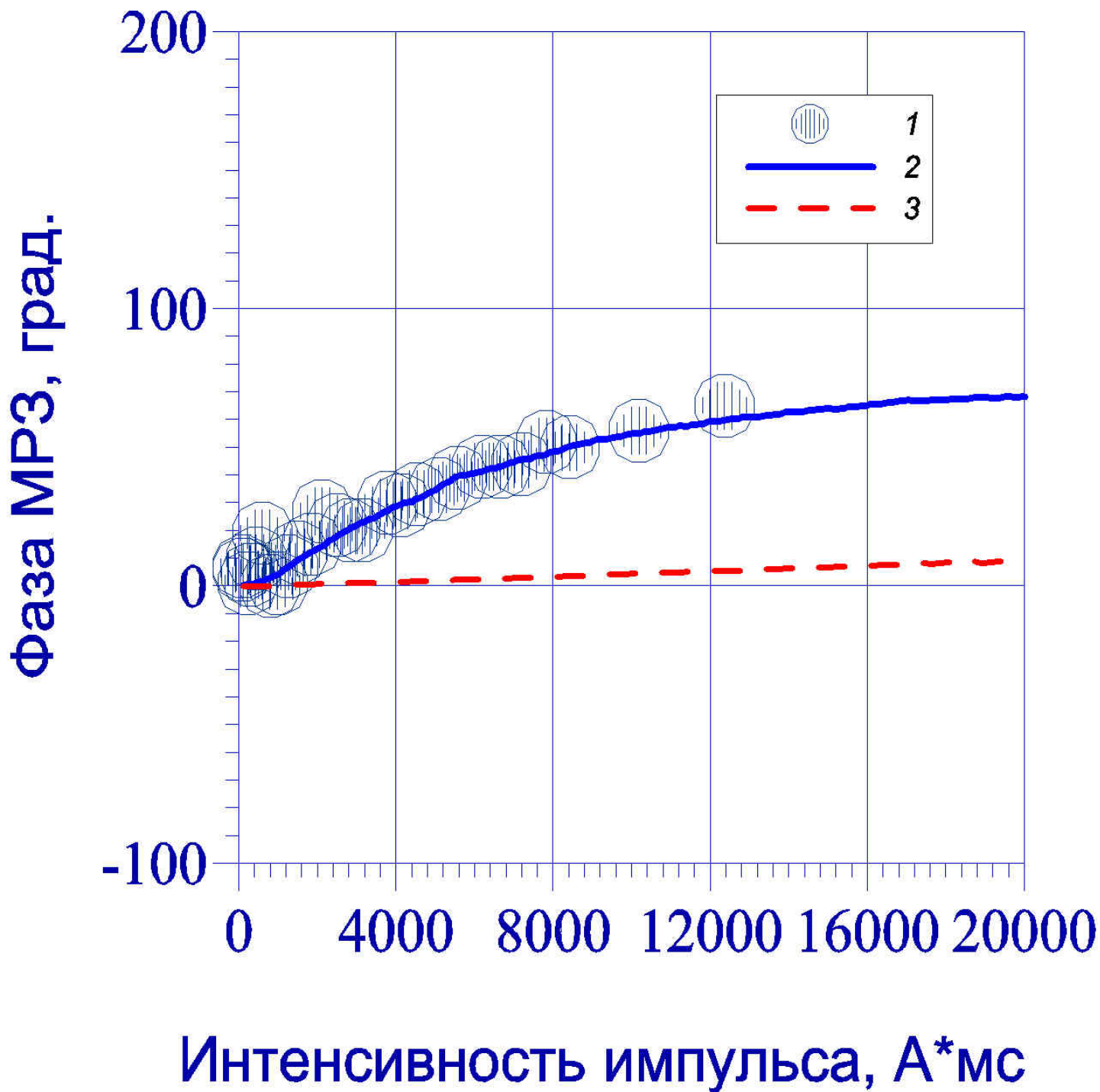
0 20 40 60 80 100

Глубина, м









Содержание воды, %

0 5 10 15 20 25

Глубина, м

