



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Я.К. Леопольд, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: Yaroslav.Leopold@gmail.com*

При проведении геофизических съемок методом переходных процессов объектов, содержащих суперпарамагнитные частицы, эффекты магнитной вязкости могут оказывать значительное влияние на получаемый сигнал. В настоящее время подобные эффекты считаются помехой, в то время как некоторые исследователи указывают на то, что они содержат полезную информацию об исследуемой среде.

В статье приведено моделирование импульсных характеристик вязкой намагниченности. Используя модель логнормального распределения частиц, были смоделированы различные импульсные характеристики намагниченности. Представлены результаты попыток восстановить параметры распределения σ и V_m модельных импульсных характеристик. Приведена оценка эффективности инверсии синтетических импульсных характеристик.

Магнитная вязкость, суперпарамагнетизм, импульсная характеристика, математическое моделирование, инверсия, погрешность

MATHEMATICAL MODELING OF IMPULSE RESPONSE OF VISCOUS REMANENT MAGNETIZATION

Ya.K. Leopold, N.O. Kozhevnikov, E.Yu. Antonov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: Yaroslav.Leopold@gmail.com*

TEM survey under objects that containing superparamagnetic particles, the effects of magnetic viscosity can have a significant impact on the received signal. At present, such effects of magnetic viscosity are considered a nuisance, while some researchers point out that they contain useful information.

The article presents a mathematical modeling of impulse response of viscous remanent magnetization. Using the lognormal particle distribution model, various impulse responses of the magnetization were modeled. The results of attempts to restore the distribution parameters σ and V_m of model impulse responses are presented. An estimate of the effectiveness of the inversion of synthetic impulse responses is given.

Viscous magnetization, superparamagnetism, impulse response, mathematical modeling, inversion, accuracy

ВВЕДЕНИЕ

Мелкодисперсные магнитные частицы привлекают интерес исследователей с 40-х годов прошлого века, изучение их свойств является непростой научной и технической задачей [Néel, 1949; Dormann et al., 1997]. Связанные с ними эффекты магнитной вязкости может быть следствием различных физических процессов.

В большинстве случаев при проведении геофизических съемок методом переходных процессов (МПП) эффекты магнитной вязкости слабо проявлены по сравнению с вкладом вихревых токов. Однако существуют геологические природные и антропогенные объекты, в присутствии которых эффекты магнитной вязкости становятся заметными или даже преобладающими. Обычно проявления магнитной вязкости рассматривают как геологическую помеху, затрудняющую интерпретацию данных МПП в терминах «нормальной» электропроводности [Buselli, 1982; Pasion et al., 2002]. Вместе с тем, результаты некоторых исследований свидетельствуют о том, что измеряемые с помощью индуктивных методов эффекты магнитной вязкости отражают особенности генезиса и строения природных и антропогенных геологических сред и объектов, а также происходивших в приповерхностных слоях геологических процессов [Kozhevnikov et al., 2001].

Для исследования свойств магнитной вязкости во временной области была создана лабораторная индукционная установка на базе электроразведочной FastSnap для метода переходных процессов. Разработанная установка дала возможность исследовать переходные процессы, связанные с релаксацией намагниченности суперпарамагнитных частиц. Для описания получаемых импульсных характеристик намагниченности обычно использовалась степенная функция at^{-b} . Различные образцы имели разную амплитуду a и показатель степени b , причем отличия показателя степени b от единицы превышали погрешности его определения (об установке и результатах ее использования можно прочитать в статье [Камнев и др., 2015]). Следующим шагом исследований было математическое моделирование импульсных характеристик вязкой намагниченности для оценки возможностей проведения интерпретации переходных процессов магнитной вязкости с целью получения полезной информации о свойствах исследуемых образцов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ

При выборе более подходящей модели, на основе которой можно было бы давать интерпретацию импульсных характеристик использовалась литература по магнитной гранулометрии, согласно которой, распределение объемов частиц в геологических средах близко к логнормальному [Worm, 1999; Kodama, 2013]. Напомним, что плотность вероятности для логнормального распределения описывается как:

$$P(V, V_m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma V} \exp\left[-\frac{(\ln V - \ln V_m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где V_m – средний объем, σ – среднеквадратичное отклонение логарифмов объемов. Для проверки пригодности такой функции распределения при описании результатов измерений магнитной вязкости во временной области было проведено математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности.

Лабораторная установка измеряет ЭДС, индуцируемую в измерительной катушке изменяющимся магнитным потоком вследствие релаксации намагниченности образца. Чтобы результаты моделирования не были «привязаны» к какой-то конкретной измерительной системе и/или образцу, т. е. носили более общий характер, вместо ЭДС рассчитывалась производная вязкой остаточной намагниченности $J_r(t)$ ансамбля однодоменных частиц с логнормальным распределением объемов. $J_r(t)$ вычислялось по формуле [Wang et al., 2010]:

$$J_r(t) = \frac{\int_0^\infty J_0 \exp[-t/\tau(V)]VP(V)dV}{\int_0^\infty VP(V)dV},$$

$$\tau(V) = \tau_0 \exp\left(\frac{\mu_0 H_k J_s V}{kT}\right),$$

где J_0 – начальная (т. е. в момент, когда выключается намагничивающее поле) намагниченность. При расчете τ использовались параметры для магнетита: $\mu_0 H_k = 25$ мТ, $J_s = 478$ кА/м [Dunlop and Özdemir, 1997]. Предполагалось, что $T = 293$ °К, что соответствует комнатной температуре. Также было принято, что начальная намагниченность J_0 и суммарный объем частиц, определяемый интегралом в знаменателе, равны единице; значения ЭДС при этом получаются в условных единицах.

В верхней части рис. 1а показаны три распределения $f(V)$, описываемые выражением (1). Они имеют одно и то же среднеквадратичное отклонение ($\sigma = 0.8$), однако разный средний объем: $V_m = 2 \cdot 10^{-24}$, $4 \cdot 10^{-24}$ и $8 \cdot 10^{-24}$ м³. На рис. 1а приведены соответствующие импульсные характеристики. Влияние среднеквадратичного отклонения иллюстрирует рис. 1б. Здесь вверху приведены графики распределений, характеризующихся одним и тем же средним объемом ($V_m = 4 \cdot 10^{-24}$ м³), но разным среднеквадратичным отклонением ($\sigma = 0.6, 0.8$ и 1.0). Импульсные характеристики намагниченности показаны в нижней части рис. 1, б.

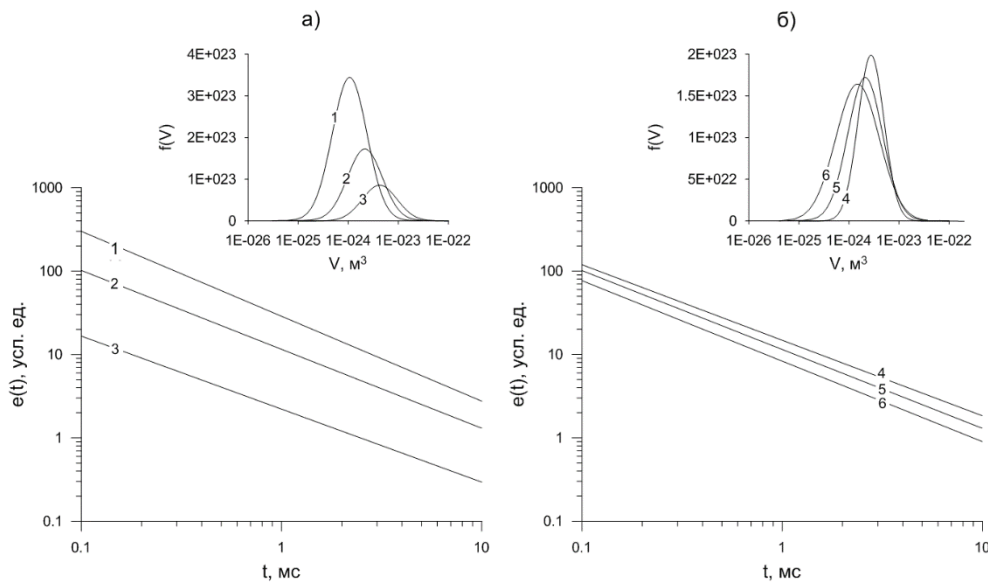


Рис. 1. Влияние параметров V_m (а) и σ (б) логнормального распределения объемов однодоменных частиц на импульсные характеристики намагниченности

Параметры распределения, а также степенной зависимости, аппроксимирующей импульсные характеристики, объединены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры распределения и степенной зависимости, аппроксимирующей соответствующую импульсную характеристику

| Распределение, № | $V_m, 10^{-24} \text{ м}^3$ | σ | a | b |
|------------------|-----------------------------|----------|------|------|
| 1 | 2 | 0.8 | 33.2 | 1.10 |
| 2, 5 | 4 | 0.8 | 29.5 | 1.02 |
| 3 | 8 | 0.8 | 12.5 | 0.95 |
| 4 | 4 | 0.6 | 44 | 1.04 |
| 6 | 4 | 1.0 | 20 | 1.01 |

Спад ЭДС, описываемый степенной зависимостью $a \cdot t^{-b}$ с показателем степени b аппроксимирующей функции близким к единице, очень схож с ЭДС индуцируемой ансамблем частиц с распределением Фрелиха [Камнев и др., 2015]. Если бы такие данные были бы получены в полевых работах или лаборатории, то отличие показателя степени от единицы можно было бы отнести к влиянию погрешности измерений.

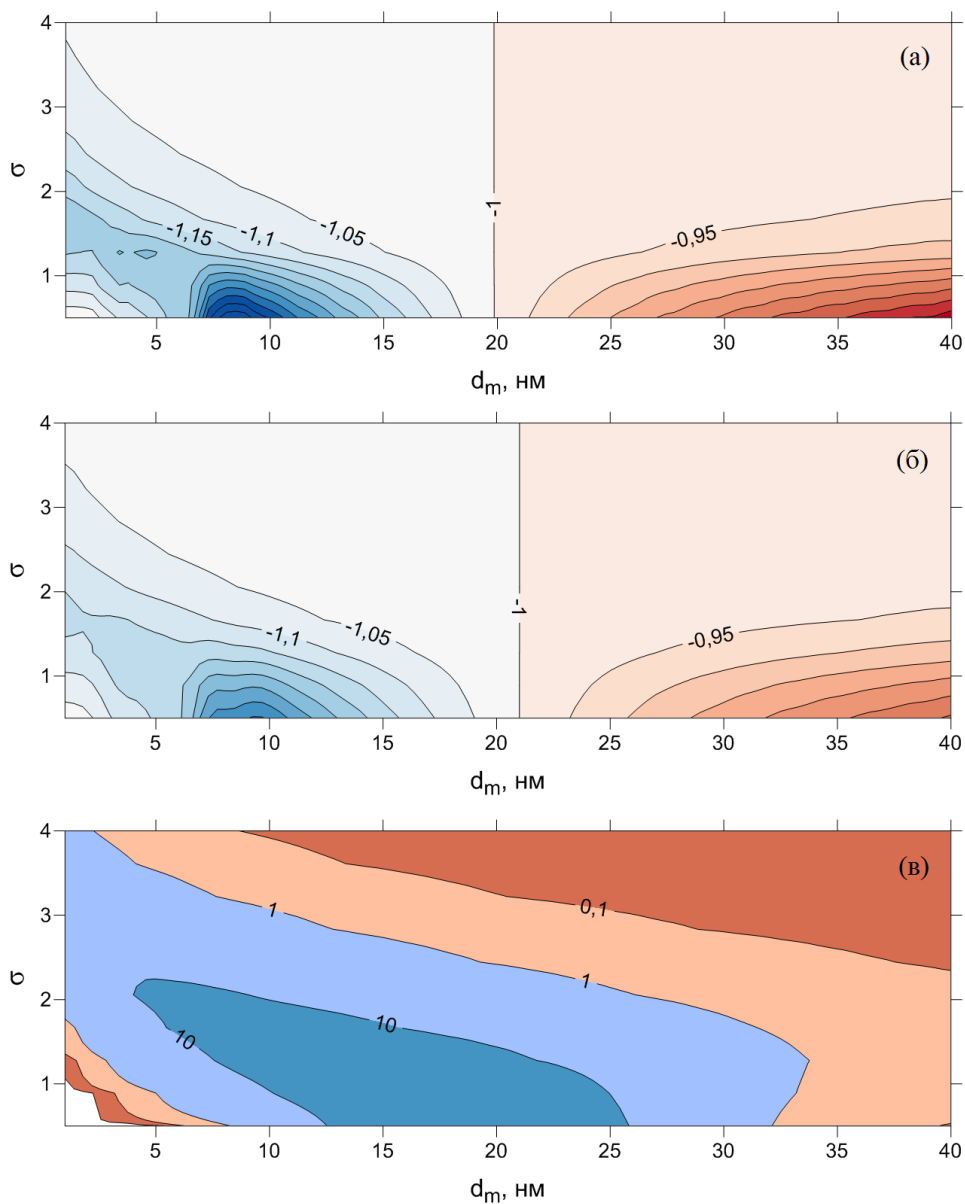


Рис. 2. Карты значений показателя степени (а, б) и амплитуды (в) степенных функций, аппроксимирующих модельные импульсные характеристики намагниченности в зависимости от различных параметров логнормального распределения объемов частиц (σ , d_m). Аппроксимации проводились в двух временных диапазонах. На рисунке (а) представлены значения показателя степени при аппроксимации во временном диапазоне от 100 мкс до 1 мс. На рисунках (б, в) представлены значения показателя степени и амплитуды соответственно при аппроксимации во временном диапазоне от 1 до 10 мс

На рисунке 2 изображены параметры степенных функций, аппроксимирующих модельные импульсные характеристики намагниченности при различных параметрах логнормального распределения объемов магнитных частиц σ , V_m (в большинстве публикаций размеры частиц представляются их диаметром, поэтому здесь и далее вместо среднего объема V_m приводится диаметр частицы среднего

объема d_m). Аппроксимация проводилась в двух временных диапазонах: 100 мкс – 1 мс и 1 мс – 10 мс. Из рисунка 2, а, б видно, что в различных временных диапазонах модельные импульсные характеристики аппроксимируются разными степенными функциями. Подобное поведение наблюдалось и у экспериментально полученных импульсных характеристик намагниченности.

Модельные импульсные характеристики намагниченности по форме схожи с получаемыми экспериментально. Это обстоятельство свидетельствует о возможности описания импульсных характеристик намагниченности в рамках модели логнормального распределения по размерам мелких магнитных частиц.

Результаты математического моделирования также показали (рис. 2, в), что от параметров распределения объемов частиц (σ , d_m) зависит амплитуда импульсной характеристики. Полученные результаты можно использовать для оценки чувствительности лабораторной установки к распределениям частиц с различными параметрами. Как видно из рис. 2, в лабораторная установка более чувствительна к узким распределениям. ($\sigma < 2$) с диаметром частиц среднего объема d_m в диапазоне от 10 нм до 25. Исходя из того, что различие по амплитуде полученных экспериментально импульсных характеристик составляет примерно два порядка, можно условно обозначить область чувствительности лабораторной установки «синей» областью на рис. 2, в.

ИНВЕРСИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Используя модель логнормального распределения частиц, были смоделированы различные импульсные характеристики намагниченности. Следующий шаг заключался в попытке восстановить параметры распределения σ и V_m модельных импульсных характеристик. Для решения обратной задачи была написана программа на языке Matlab. При определении параметров минимизировалась целевая функция:

$$F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{u(t_n) - v(t_n)}{u(t_1) - v(t_1)} \frac{u(t_n)}{u(t_1)} \right\}^2},$$

где $u(t)$ – синтетическая импульсная характеристика, а $v(t)$ – импульсная характеристика, рассчитанная при заданных параметрах σ и V_m . В таком представлении целевая функция реагирует только на форму импульсной характеристики, а не на амплитуду. Нормирование на начальную амплитуду необходимо, потому что она зависит не только от параметров распределения, но и от суммарного объема частиц, параметров намагничивающего поля, геометрии генераторно-измерительной системы и т. д. Однако, зная параметры функции распределения σ и V_m , и эмпирически определив константы, связанные с измерительной установкой, из начальной амплитуды можно рассчитать суммарный объем частиц.

Написанная программа для решения обратной задачи однозначно определяла параметры σ и V_m модельных кривых. Однако реальные переходные процессы осложнены случайными шумами. От этих шумов зависит погрешность определения параметров распределения. Для того чтобы оценить возможности восстановления параметров зашумленных импульсных характеристик, была проведена серия численных экспериментов.

При лабораторных измерениях импульсных характеристик намагниченности было установлено, что относительное среднеквадратичное отклонение измеряемых сигналов составляет примерно 2–7 % в

зависимости от амплитуды (а). Важно отметить, что часть (для сильномагнитных образцов значительная) этой погрешности приходится на дрейф импульсной характеристики. При этом, поскольку подбирается только форма сигнала, на решение обратной задачи влияет только погрешность, вносимая случайными шумами.

Сначала была предпринята попытка подобрать параметры модельной импульсной характеристики с параметрами $\sigma = 1$ и $V_m = 2.4 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ (что соответствует частице с $d_m = 20 \text{ нм}$), на которую наложен нормальный шум с $\sigma_{\text{ш}} = 3 \%$. Временной диапазон был выбран от 1 до 10 мс, в нем почти для всех измеренных образцов удавалось зарегистрировать стабильный переходный процесс на порядок выше уровня шумов. Для отыскания оптимального решения строилась карта целевой функции (рис. 3, а).

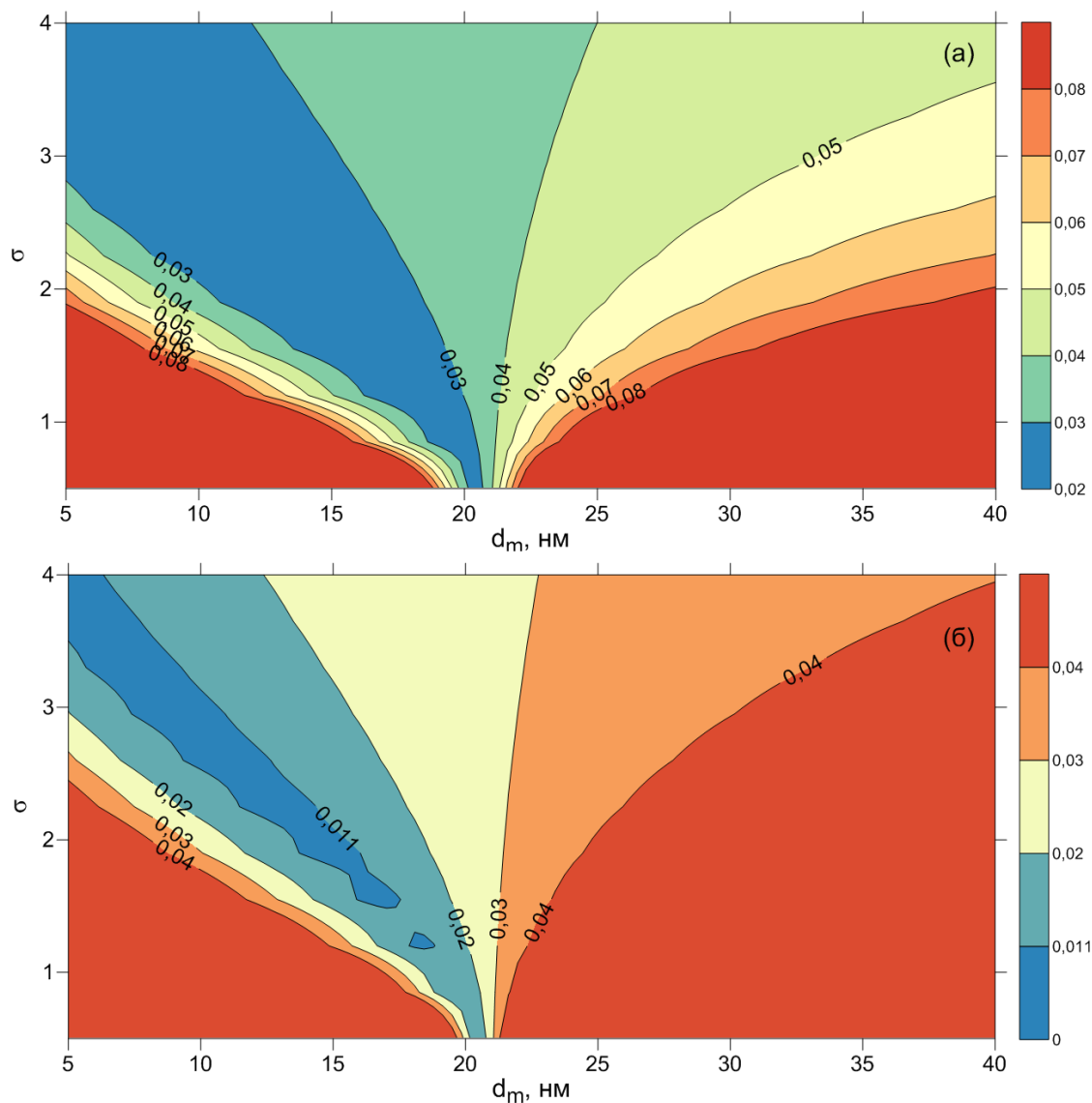


Рис. 3. Карта целевой функции (построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности с параметрами логнормального распределения $\sigma=1$, $d_m=20 \text{ нм}$) рассчитанной во временном диапазоне 1–10 мс, с наложенным нормальным шумом с $\sigma_{\text{ш}}=3 \%$ (а) и $\sigma_{\text{ш}}=1 \%$ (б)

На рисунке видно, что область минимума целевой функции растянулась от «истинных» параметров до граничных значений параметров σ и d_m . Значения целевой функцией располагаются внутри этой границы порядка погрешности, вносимой шумами. Очевидно, что при 3 % нормальном шуме можно оценить область возможных значений параметров модельной импульсной характеристики, однако

она довольно большая и почти перекрывает всю предполагаемую чувствительность лабораторной установки. Уменьшение уровня шумов до 1 % несколько сужает область возможных решений (рис. 3, б), однако она все равно остается сильно вытянутой и содержит большое множество возможных комбинаций параметров начального распределения.

Импульсные характеристики намагниченности ансамблей частиц с параметрами распределения внутри этой «синей» окрестности незначительно отличаются друг от друга. Как показало моделирование, для того чтобы различить параметры распределения, необходимо измерить импульсные характеристики намагниченности с очень высокой точностью, порядка 0.1 %. Достичь такой точности измерения импульсных характеристик в лабораторных условиях пока не представляется возможным. Вместо этого был расширен временной диапазон расчета модельных импульсных характеристик намагниченности: с 1–10 до 0.1–100 мс. В этом временном диапазоне лабораторная установка позволяет исследовать переходные процессы для образцов с высоким содержанием суперпарамагнитных частиц ($a > 20$). Карта целевой функции, построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности в расширенном временном диапазоне и наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш} = 1 - 3 \%$, изображена на рис. 4.

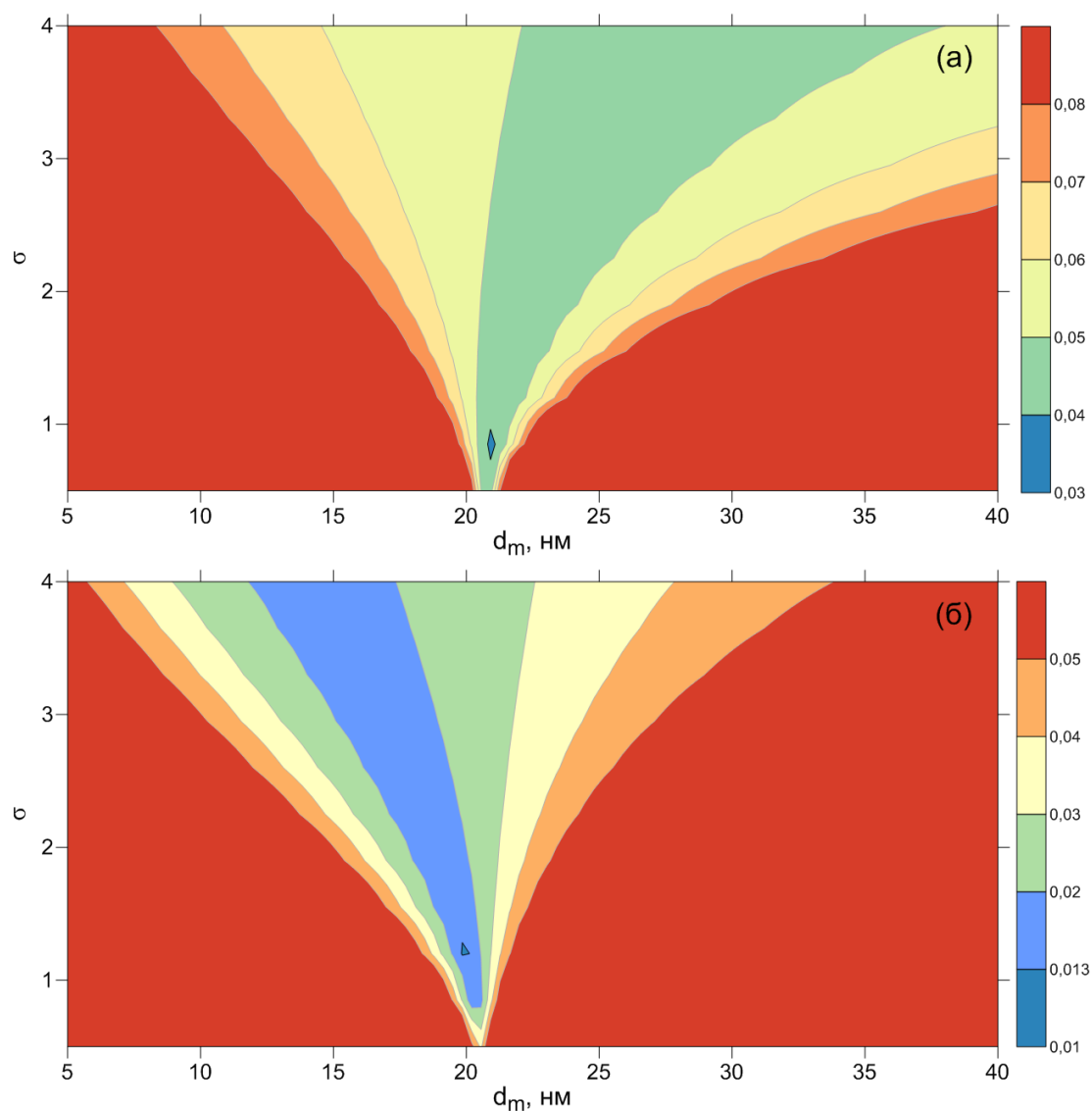


Рис. 4. Карта целевой функции (построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности с параметрами логнормального распределения $\sigma=1$, $d_m=20$ нм) рассчитанной во временном диапазоне 0.1–100 мс, с наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш}=3 \%$ (а) и $\sigma_{ш}=1 \%$ (б)

На картах целевой функции, рассчитанных для расширенного временного диапазона измерений, почти всегда имеется небольшая область минимума, находящаяся возле параметров изначального не зашумленного переходного процесса. Область возможных значений становится уже и ближе к изначальным параметрам по мере уменьшения уровня нормального шума. Таким образом, для импульсных характеристик намагниченности смоделированных во временном диапазоне 0.1–100 мс с наложенным нормальным шумом $\sigma_{ш} = 1 - 3 \%$ картируется небольшая область возможных параметров логнормального распределения размеров суперпарамагнитных частиц, близкая к параметрам (или включающая их) изначальной, не зашумлённой модельной импульсной характеристики намагниченности.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕРСИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Как уже отмечалось ранее, амплитуда и форма импульсной характеристики намагниченности зависит от параметров распределения объемов частиц. Логично предположить, что при различных начальных параметрах распределения область возможных параметров, определенная по зашумленным данным, будет тоже отличаться.

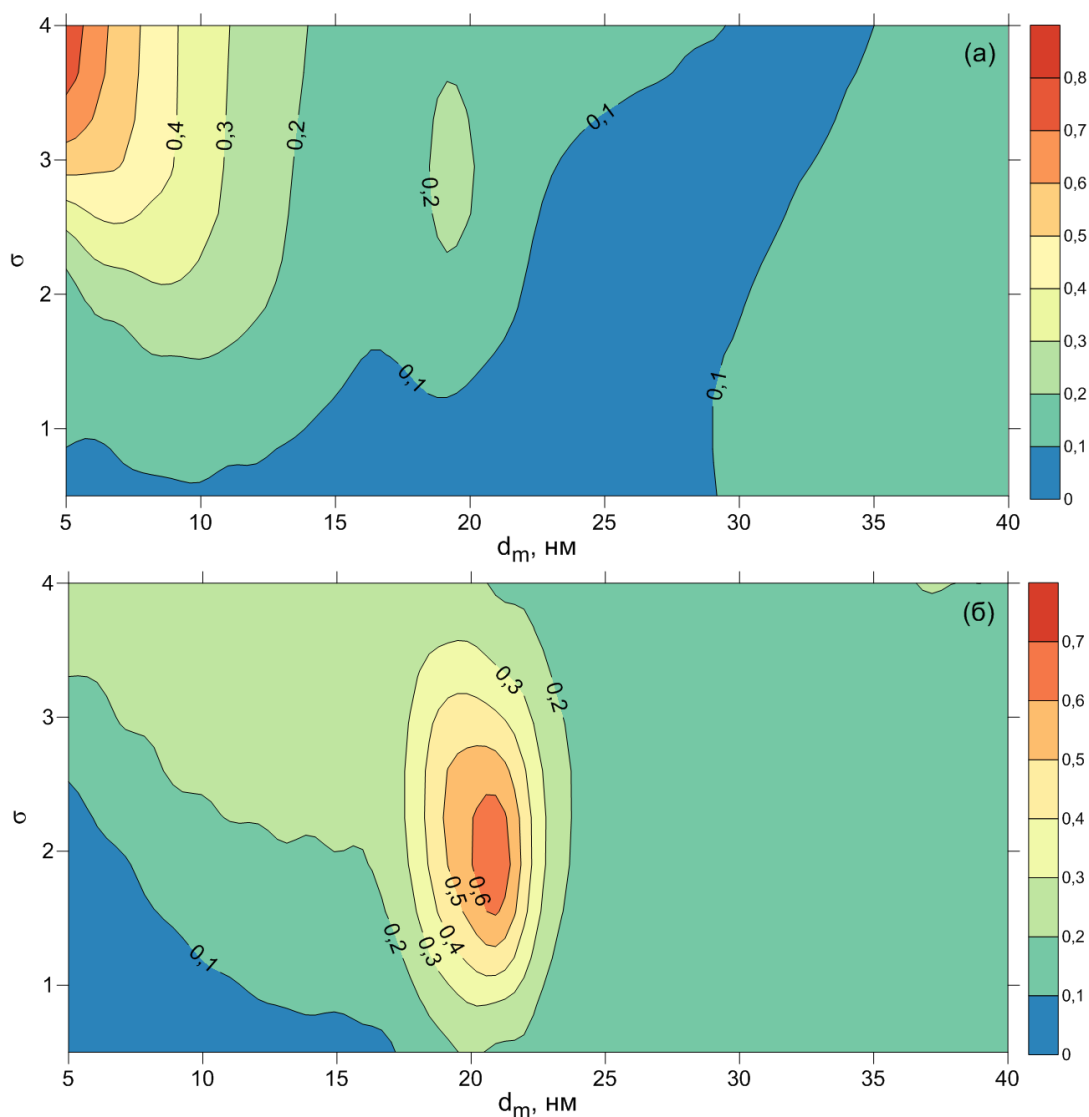


Рис. 5. Относительное среднеквадратичное отклонение подобранных значений d_m (а) и σ (б) логнормального распределения объемов частиц. Инверсия проводилась на синтетических импульсных характеристиках с наложенным 1 % нормальным шумом во временном диапазоне 0.1–100 мс.

Для оценки погрешности решения обратной задачи проведен численный эксперимент. Была взята область параметров $\sigma \in [0.5; 4]$ $d_m \in [5; 30]$, которая покрывает большую часть зоны чувствительности экспериментальной установки. Внутри этой области для каждого набора параметров с шагом $\sigma = 0.01$ и $d_m = 0.1$ нм рассчитывались 500 импульсных характеристик с наложенным разным 1 и 5 % нормальным шумом. Целевая функция минимизировалась с помощью алгоритма Нелдера-Мида [Nelder, 1965]. Начальная точка для поиска была выбрана с координатами $0.8 \cdot \sigma$ $1.2 \cdot d_m$, чтобы алгоритм подбора остановился на нижней границе области возможных решений. Полученный набор подобранных параметров использовался для статистической оценки их среднеквадратичного отклонения от начальных параметров. Результаты эксперимента приведены на рис. 5, 6.

Из рисунка 5 видно, при низком уровне шума (1 %) параметр d_m подбирается с погрешностью 10–20 % практически на всей области параметров. Только при широких распределениях с малым d_m погрешность вырастает до 50–80 %. Параметр σ тоже неплохо подбирается (с погрешностью 10–20 %) на большой области параметров, однако погрешность возрастает вблизи параметров $d_m = 22$ нм, $\sigma = 2$ и может составлять 60 %.

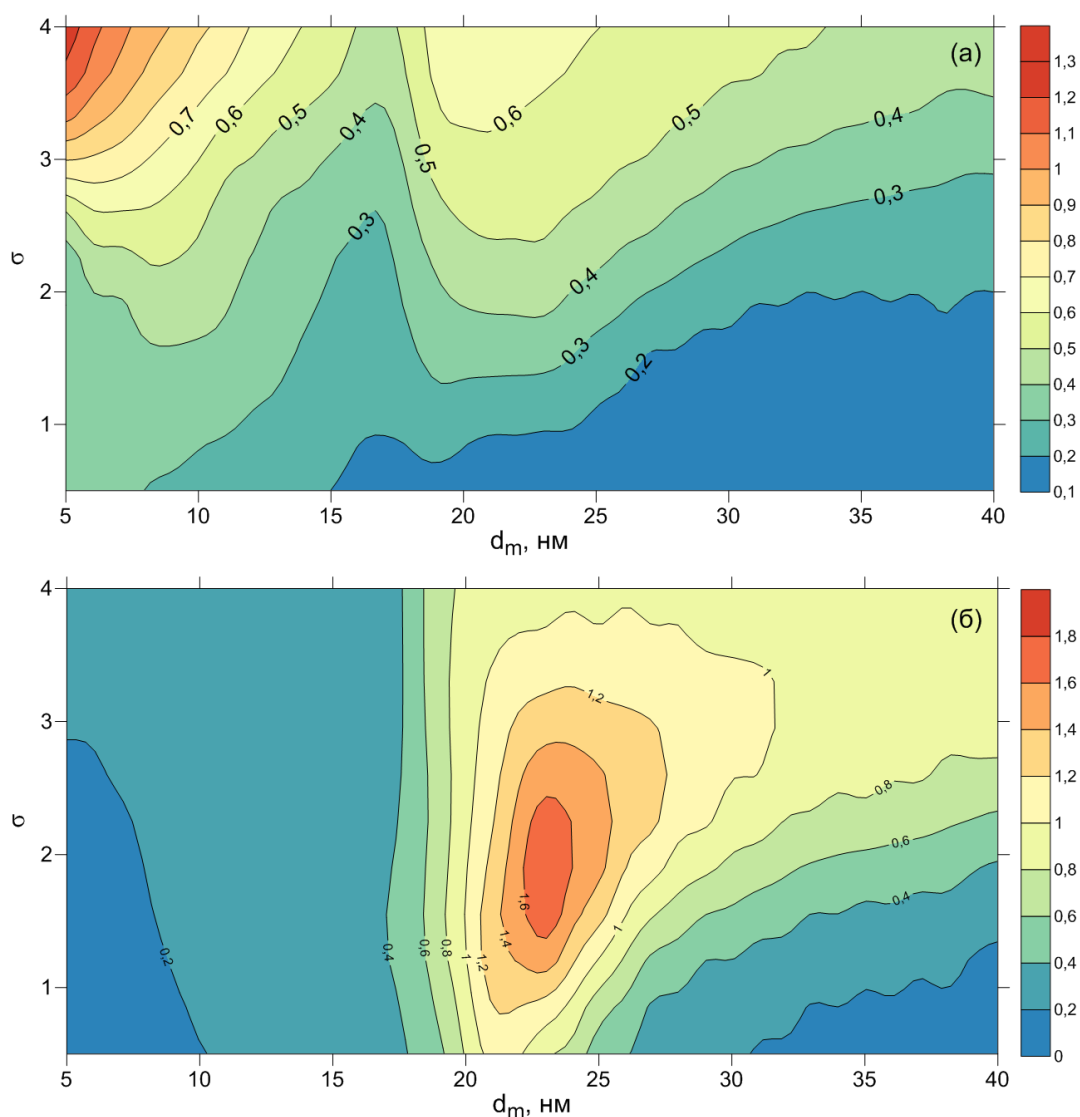


Рис. 6. Относительное среднеквадратичное отклонение подобранных значений d_m (а) и σ (б) логнормального распределения объемов частиц. Инверсия проводилась на синтетических импульсных характеристиках с наложенным 5 % нормальным шумом во временном диапазоне 0.1–100 мс.

На рисунке 6 видно, что при высоком уровне шумов (5 %), среднеквадратичное отклонение подобранных параметров имеет схожее (с низким уровнем шумов) поведение, однако значения погрешностей значительно возрастают. Но все же, в некоторых областях параметры изначального логнормального распределения подбираются с точностью порядка 20 %.

Полученные результаты свидетельствуют, что при исследованиях во временном диапазоне 0.1–100 мс при низком уровне шумов можно восстанавливать значения начальных параметров модельного логнормального распределения частиц с приемлемой погрешностью почти во всей области чувствительности лабораторной индукционной установки.

ВЫВОДЫ

Как показало математическое моделирование, импульсные характеристики длительностью от 1 до 10 мс при средней погрешности измерений могут быть использованы для определения области возможных значений параметров распределения. Импульсные характеристики длительностью от 0.1 до 100 мс позволяют получать более точные значения параметров σ и V_m со среднеквадратичным отклонением до 10–20 %. Априорная информация о параметрах распределения и увеличение точности измерений может позволить существенно уменьшить погрешность определения параметров распределения магнитных частиц.

Таким образом, результаты исследований магнитной вязкости во временной области с помощью лабораторной установки можно использовать для оценки параметров распределения магнитных частиц в рамках логнормальной модели.

ЛИТЕРАТУРА

- Камнев Я.К., Кожевников Н.О., Казанский А.Ю., Стефаненко С.М.** Импульсная характеристика вязкой намагниченности и ее измерение с помощью лабораторной индукционной установки // Геология и геофизика. – 2015. – № 56 (11). – С. 2076–2091, doi: 10.15372/GiG20151110.
- Buselli G.** The effect of near surface superparamagnetic material on electromagnetic transients // Geophysics. – 1982. – Vol. 47 (9). – P. 1315–1324, doi: 10.1190/1.1441392.
- Dormann J.L., Fiorani D., Tronc E.** Magnetic relaxation in fine-particle systems // Advances in chemical physics, Vol. 48. – John Wiley & Sons, Inc., 1997. – P. 283–494, doi: 10.1002/9780470141571.ch4.
- Dunlop D.J., Özdemir Ö.** Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. – Cambridge University Press, 1997. – 573 p.
- Kodama K.** Application of broadband alternating current magnetic susceptibility to the characterization of magnetic nanoparticles in natural materials // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2013. – Vol. 118 (1). – P. 1–12, doi: 10.1029/2012JB009502.
- Kozhevnikov N.O., Kharinsky A.V., Kozhevnikov O.K.** An accidental geophysical discovery of an Iron Age archaeological site on the western shore of Lake Baikal // Journal of Applied Geophysics. – 2001. – Vol. 47 (2). – P. 107–122, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00051-9.
- Néel L.** Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites // Annales de Géophysique. – 1949. – Vol. 5. – P. 99–136.
- Nelder J.A., Mead R.** A simplex method for function minimization // Computer Journal. – 1965. – Vol. 7. – P. 308–313.
- Pasion L.R., Billings S.D., Oldenburg D.W.** Evaluating the effects of magnetic soils on TEM measurements for UXO detection // Expanded Abstracts. – Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2002. – P. 1428–1431.
- Wang X., Løvlie R., Zhao X., Yang Z., Jiang F., Wang S.** Quantifying ultrafine pedogenic magnetic particles in Chinese loess by monitoring viscous decay of superparamagnetism // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2010. – Vol. 11 (10). – Q10008, doi: 10.1029/2010GC003194.

Worm H.-U. Time-dependent IRM: A new technique for magnetic granulometry // *Geophysical Research Letter*. – 1999. – Vol. 26 (16). – P. 2557–2560, doi: 10.1029/1999GL008360.

REFERENCES

- Buselli G.** The effect of near surface superparamagnetic material on electromagnetic transients // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47 (9). – P. 1315–1324, doi: 10.1190/1.1441392.
- Dormann J.L., Fiorani D., Tronc E.** Magnetic relaxation in fine-particle systems // *Advances in chemical physics*, Vol. 48. – John Wiley & Sons, Inc., 1997. – P. 283–494, doi: 10.1002/9780470141571.ch4.
- Dunlop D.J., Özdemir Ö.** *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. – Cambridge University Press, 1997. – 573 p.
- Kamnev Ya.K., Kozhevnikov N.O., Kazansky A.Yu., Stefanenko S.M.** Impulse response of viscous remanent magnetization: laboratory measurements by a pulse induction system // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – Vol. 56 (11). – P. 1642–1651, doi: 10.1016/j.rgg.2015.10.010.
- Kodama K.** Application of broadband alternating current magnetic susceptibility to the characterization of magnetic nanoparticles in natural materials // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118 (1). – P. 1–12, doi: 10.1029/2012JB009502.
- Kozhevnikov N.O., Kharinsky A.V., Kozhevnikov O.K.** An accidental geophysical discovery of an Iron Age archaeological site on the western shore of Lake Baikal // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 47 (2). – P. 107–122, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00051-9.
- Néel L.** Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites // *Annales de Géophysique*. – 1949. – Vol. 5. – P. 99–136.
- Nelder J.A., Mead R.** A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. – 1965. – Vol. 7. – P. 308–313.
- Pasion L.R., Billings S.D., Oldenburg D.W.** Evaluating the effects of magnetic soils on TEM measurements for UXO detection // *Expanded Abstracts*. – Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2002. – P. 1428–1431.
- Wang X., Løvlie R., Zhao X., Yang Z., Jiang F., Wang S.** Quantifying ultrafine pedogenic magnetic particles in Chinese loess by monitoring viscous decay of superparamagnetism // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2010. – Vol. 11 (10). – Q10008, doi: 10.1029/2010GC003194.
- Worm H.-U.** Time-dependent IRM: A new technique for magnetic granulometry // *Geophysical Research Letter*. – 1999. – Vol. 26 (16). – P. 2557–2560, doi: 10.1029/1999GL008360.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЛЕОПОЛЬД Ярослав Константинович – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: электроразведка, криолитозона, магнитная вязкость, машинное обучение.

КОЖЕВНИКОВ Николай Олегович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: импульсная индуктивная электроразведка, геофизика криолитозоны, археогеофизика, археометаллургия, Приольхонье.

АНТОНОВ Евгений Юрьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: математическое моделирование электромагнитных полей, метод переходных процессов, вызванная поляризация.

*Статья поступила в редакцию 14 ноября 2022 г.,
принята к публикации 23 декабря 2022 г.*