

Вклад магнитного последействия в индукционные переходные характеристики базальтов Витимского плато

© А. Ю. Казанский¹, Г. Г. Матасова¹, Н. О. Кожевников¹,
Е. Ю. Антонов¹, П. С. Максимов², 2012

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²БФ «Сосновгеология» ФГУПП «Урангео», Иркутск, Россия

Поступила 7 мая 2012 г.

Представлено членом редколлегии М. И. Орлюком

Для вивчення ефекту магнітної післядії (магнітній в'язкості), прояви якої утруднюють інтерпретацію даних методу перехідних процесів, проведено комплексні експериментальні дослідження зразків гірських порід верхньої товщі Вітімського базальтового плато. Зроблено спробу встановити характер розподілу магнітов'язких порід у межах вулканогенно-осадової товщі і з'ясувати, з якими ферромагнітними частинками пов'язані прояви ефекту магнітної післядії під час вимірювання індукційних перехідних параметрів. Показано, що за вимірювання у часовому діапазоні за допомогою індукційних систем найбільший внесок в ефект магнітної післядії в індукційні перехідні параметри здійснюють найменш змінені породи. Ефект магнітної післядії проявляється за наявності здебільшого суперпарамагнітних зерен високозалістистих титаномангнетитів, близьких за складом до магнетиту, розміри яких мають достатньо вузький інтервал (наймовірніше, 0,0254—0,029 мкм). Внесок релаксації намагніченості дрібніших суперпарамагнітних зерен в індукційні перехідні параметри приблизно втричі нижчий. Запропоновано можливі критерії діагностики суперпарамагнітних частинок різного розміру за петромагнітними даними.

To study magnetic aftereffect (magnetic viscosity) with its manifestations making difficulties for interpretation of the data of transitional processes, comprehensive experimental studies of samples have been conducted, which characterize the upper rock mass of the Vitim basaltic plateau. An attempt to reveal the character of distribution of magnetically viscous rocks within volcano-sedimentary succession of strata has been made and to find out which ferromagnetic particles display the effect of magnetic viscosity on the inductive transient response. It has been shown that in time-domain measurements with inductive systems the greatest contribution of magnetic viscosity effect is brought by the most fresh, unchanged rocks. Magnetic viscosity effect is mainly caused by super-paramagnetic grains of low-titanic titanomagnetite, close to pure magnetite with rather narrow grain-size interval (most probably 0.0254-0.029 μm). As for the smaller superparamagnetic grains, the contribution of relaxation of their magnetization to inductive transient responses is approximately 3 times lower. Possible criteria of diagnostics of superparamagnetic particles of different size are proposed on the base of petro-magnetic data.

Введение. Магнитное последействие (магнитная вязкость) — одно из фундаментальных свойств ферромагнитных материалов. Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферромагнетиков (намагниченности, магнитной проницаемости и др.) по отношению к изменениям напряженности внешнего магнитного поля. Диапазон характерных времен таких изменений (времен релаксации) составляет от долей секунд до десятков тысяч лет [Нагата 1965; Dunlop, Ozdemir, 1997 и др.]. Эффект магнитного последействия имеет место практически во всех ферромагнитных материалах, а также

в горных породах. Размеры зерен магнитных минералов в породах варьируют от долей микрометра до нескольких сотен микрометров и в соответствии с размером зерна имеют различное доменное состояние — одно- или многодоменное. Проявление магнитного последействия в однодоменных частицах связывается с явлением суперпарамагнетизма, в многодоменных — с диффузией частиц и дефектов в кристаллической решетке магнитного минерала [Трухин, 1973].

Как правило, при проведении геофизических съемок методами индуктивной электрозвездки эффекты магнитного последействия

незначительны по сравнению с вкладом вихревых токов. Однако существуют объекты, где эти эффекты весьма значительны и их влияние уже нельзя игнорировать [Кожевников, Антонов, 2008; Антонов и др., 2011]. Один из таких объектов — толща неогеновых базальтов Витимского плато (Восточная Сибирь, Республика Бурятия). Здесь, в пределах Амалатского плато в междуречье Бол. Амалата и Джилинды, интерпретация результатов зондирований методом переходных процессов (ЗМПП), которые проводятся на данной территории с целью поисков уранового оруденения в осадках древних речных долин, погребенных под толщей неогеновых базальтов, существенно осложняется из-за эффектов магнитного последействия.

На рис. 1 показаны типичные результаты зондирований методом переходных процессов при поисках урановых месторождений, перекрытых базальтами Амалатского плато. Измерения выполнены в диапазоне от 1 мкс до 10 мс симметричной (соосной) установкой: размер

генераторной петли составлял 100×100 м, приемной — 25×25 м. Как можно видеть на графике зависимости приведенной к току ЭДС $e(t)/I$ от времени t (рис. 1, а), после окончания собственного переходного процесса измерительной системы ($t < 0,1$ мс) скорость убывания ЭДС уменьшается. На поздних ($t > 1$ мс) временах ЭДС убывает очень медленно, по закону, близкому к $1/t$. Это характерный признак того, что измеряемый сигнал контролируется не удельной электропроводностью среды, а магнитной вязкостью [Кожевников, Антонов, 2008]. При пересчете медленно убывающей ЭДС (так называемого длинного хвоста) в кажущееся удельное сопротивление ρ_t на графиках зависимости от времени, называемых кривыми ρ_t , появляется крутопадающая ветвь, описываемая зависимостью $1/t$ (рис. 1, б). Если эффекты магнитного последействия не распознаны или игнорируются, интерпретация данных ЗМПП в рамках модели проводящей среды приводит к «появлению» в разрезе несуществующих в

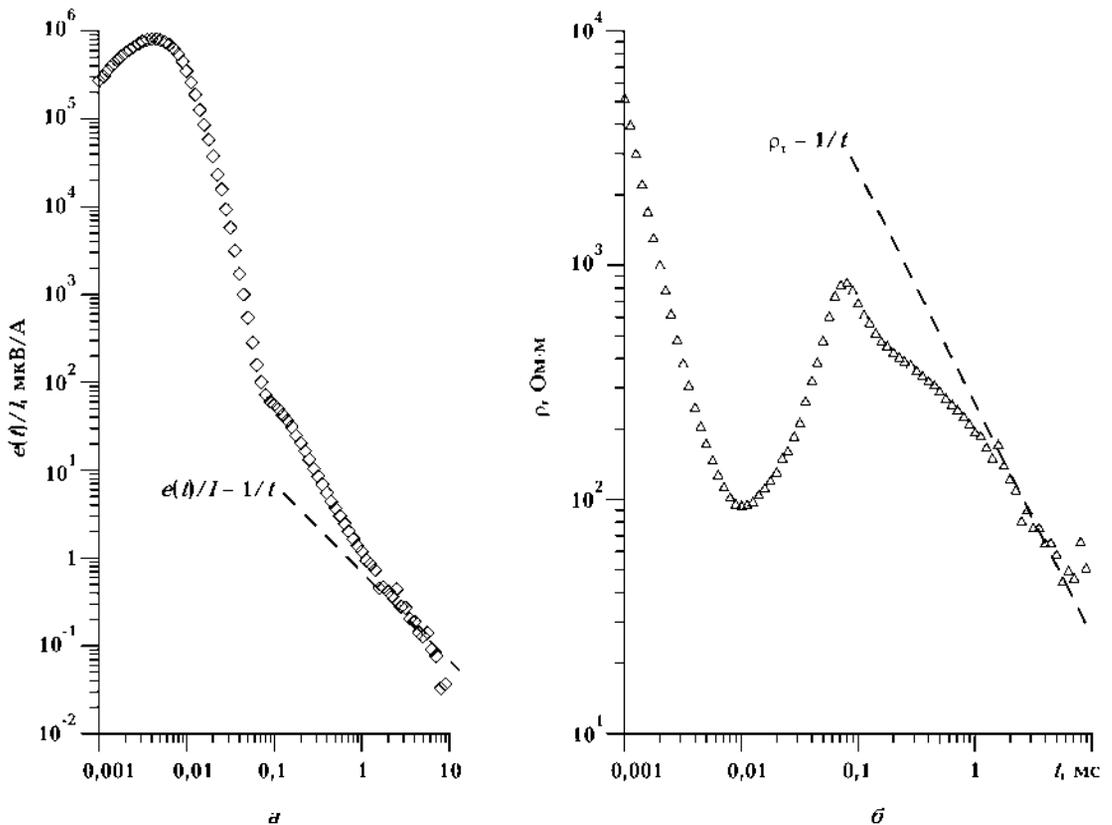


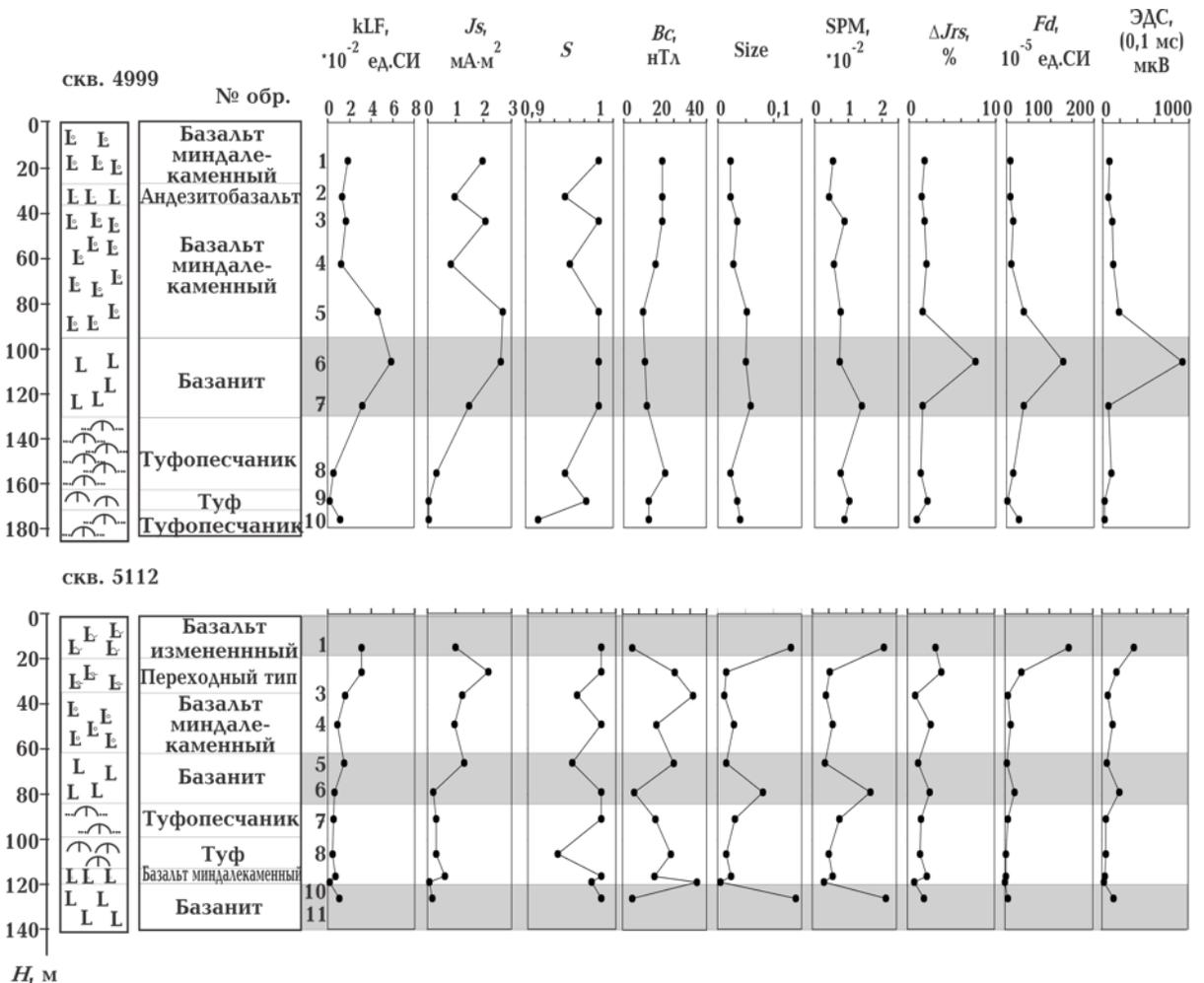
Рис. 1. Результаты ЗМПП при поисках месторождений урана, перекрытых базальтами Амалатского плато: а — переходная характеристика; б — кривая кажущегося удельного сопротивления. Штриховая линия соответствует убыванию ЭДС и/или кажущегося сопротивления по закону $1/t$.

реальности слоев с очень низким сопротивлением.

В этой связи представляется актуальным провести исследования магнитного последствия в толще перекрывающих базальтов методами магнетизма горных пород, выявить характер распределения магнитовязких пород в пределах вулканогенно-осадочной толщи и выяснить, с какими ферромагнитными частицами (состав, размеры) связаны проявления эффекта магнитного последствия в импульсной индуктивной электроразведке. Для решения поставленной проблемы нами проведены комплексные экспериментальные исследования образцов, характеризующих верхнюю толщу Витимского базальтового плато.

Краткая геологическая характеристика. Базальты Витимского нагорья образуют обширное вулканическое поле площадью

7000 км². Мощность толщи базальтовых покровов, формирующих Витимское базальтовое плато, достигает первых сотен метров [Расказов и др., 2007]. Исследуемый участок находится в пределах Амалатского плато в междуречье рек Бол. Амалат и Джилинда. В разрезе сверху вниз выделяются неогеновые покровы базальтов, вмещающая урановое оруденение вулканогенно-осадочная толща и гранитоиды фундамента палеозойского возраста [Митрофанов и др., 2010]. Нами опробована верхняя часть разреза, представленная чередованием покровов базальтов, базанитов с андезитобазальтами и их туфами. Образцы общим количеством 21 отобраны из керна двух разведочных скважин, расположенных на соседних профилях в интервале глубин 10—180 м. Состав пород и положение образцов в разрезах представлены на рис. 2.



H, м

Рис. 2. Геологические разрезы скв. 4999 и 5112, магнитные характеристики образцов и ЭДС переходного процесса, измеренная катушечной системой на времени $t=0,1$ мс. «Size» — эффективный размер магнитного зерна. Серым тоном выделены горизонты, в которых наблюдается повышенный эффект магнитного последствия.

Петромагнитные и электромагнитные параметры, использованные в работе

Параметр	Обозначение	Информативность параметра
Объемная магнитная восприимчивость (измеренная на низкой частоте)	k_{LF}	Оценивает концентрацию ферримагнетика, зависит также от состава ферримагнетика
Частотная зависимость магнитной восприимчивости	Fd	Параметр чувствителен к наличию зерен, соответствующих по размеру границе перехода между однодоменным и суперпарамагнитным состояниями
Намагниченность насыщения	J_s	Оценивает концентрацию ферримагнетика, зависит также от состава ферримагнетика
Коэрцитивная сила	B_c	Оценивает доменное состояние и размер зерна ферримагнетика, зависит от состава ферримагнетика
Остаточная намагниченность насыщения	J_{rs}	Оценивает концентрацию ферримагнетика, зависит также от состава ферримагнетика
Остаточная коэрцитивная сила	B_{cr}	Оценивает доменное состояние и размер зерна ферримагнетика, зависит от состава ферримагнетика
Парамагнитная часть магнитной восприимчивости	k_{par}	Оценивает вклад парамагнитных минералов в общую восприимчивость
Ферримагнитная часть магнитной восприимчивости	k_{fer}	Оценивает вклад ферримагнитных минералов в общую восприимчивость
Параметр магнитной жесткости	$S = \frac{-J_{rs}(-300 \text{ нТл})}{J_{rs}(700 \text{ нТл})}$	Оценивает соотношение между относительным содержанием высококоэрцитивных (магнито жестких) и низкокоэрцитивных (магнитомягких) ферримагнетиков
Эффективный размер магнитного зерна	k_{fer}/J_{rs}	Оценивает эффективный (средний) размер магнитного зерна (для многодоменных и однодоменных зерен)
Спад остаточной намагниченности насыщения после выключения поля	ΔJ_{rs}	Оценивает магнитное последствие для зерен со временами релаксации <50 мс
Параметр суперпарамагнетизма	k_{fer}/J_s	Оценивает магнитное последствие всех суперпарамагнитных зерен
ЭДС переходного процесса	ЭДС	Оценивает эффект магнитного последствия при измерениях индукционной системой во временной области

Методика исследований. Исследования магнитных свойств включали: измерения низкочастотной объемной магнитной восприимчивости (k_{LF}) и частотной зависимости магнитной восприимчивости ($Fd=k_{LF}-k_{HF}$) на приборе Bartington MS2 с двухчастотным датчиком (LF=0,47; HF=4,7 кГц). Магнитно-минералогический анализ в модификации $J_{rs}(T)$ выполнялся на терморок-генераторе системы К. С. Буракова (ИФЗ), а в модификации $J_s(T)$ — на терромагнитном анализаторе фракций конструкции Ю. К. Виноградова (обсерватория «Борок»). Изучение коэрцитивных параметров (см. таблицу) осуществлялось на коэрцитивном спектрометре J-meter конструкции П. Г. Ясонова [Jasonov et al., 1998] с максимальным намагничивающим полем 700 нТл. Вклад магнитного последствия в электромагнитное поле переходных процессов оценивался на тех же образцах по величине наведенной ЭДС с помощью двухкатушечной индукционной системы, в качестве измерителя использовалась станция Fast Snap

для зондирований методом переходных процессов, состоящая из коммутатора тока, двух регистраторов и адаптера линии связи.

Результаты исследований. Состав ферримагнитной фракции. Породы из изученных скважин существенно различаются составом магнитных минералов. По данным терромагнитного анализа $J_s(T)$ в породах из скв. 4999 состав магнитной фракции достаточно однороден и представлен высокожелезистыми (молекулярная масса менее 10 % $TiFe_3O_4$) титаномагнетитами, близкими по составу к магнетиту (температуры Кюри при первом нагреве 500—565 °С). После первого нагрева величина J_s уменьшается, а температуры Кюри смещаются к интервалу 510—515 °С, при этом форма кривой $J_s(T)$ в целом сохраняется (рис. 3, а, в). Такое поведение характерно для гетерофазно окисленных титаномагнетитов, гомогенизирующихся в процессе нагрева [Печерский, Диденко, 1995]. Результаты терромагнитного анализа J_{rs} подтверждают результаты анализа J_s (рис. 3, б,

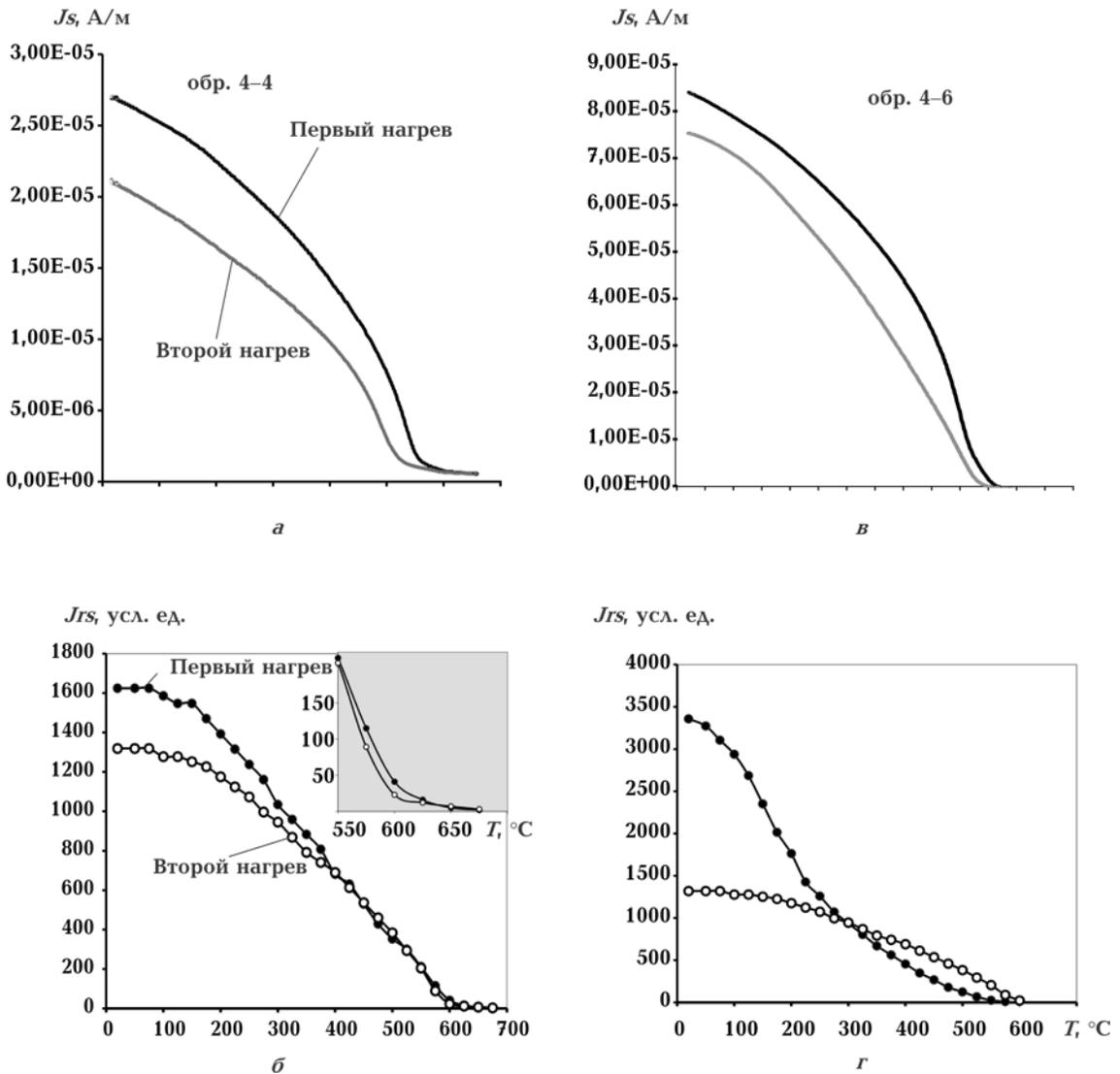


Рис. 3. Результаты термомагнитного анализа пород скв. 4999: а — кривые $J_s(T)$ — однофазно окисленный титаномagnetит (базальт миндалекаменный); б — кривые $J_{rs}(T)$, тот же образец на вставке — увеличенный фрагмент диаграммы в температурном интервале выше 500 °С, иллюстрирующий наличие гематита; в — кривые $J_s(T)$ однофазно окисленного титаномagnetита, практически обратимая кривая (базанит); г — кривые $J_{rs}(T)$, тот же образец.

г), кроме того, в образцах туфогенных пород (обр. 4-9, 4-10, 4-11) и в двух образцах базальтов (обр. 4-2, 4-4) обнаружено наличие гематита (рис. 3, б, см. вставку), который не фиксируется на кривых $J_s(T)$ ввиду его малой концентрации.

Состав магнитной фракции в породах из скв. 5112 более сложен. По результатам термомагнитного анализа $J_s(T)$, наряду с образцами, содержащими гетерофазно окисленные высокожелезистые титаномagnetиты (обр. 5-2, 5-5 и 5-8), очень близкие по составу к таковым из пород скв. 4999 (рис. 4, а—в), выделены образцы с необратимыми кривыми $J_s(T)$. В процессе нагрева исходный ферримагнетик с темпера-

турами Кюри 75—236 °С распадается с образованием новой фазы, близкой к магнетиту с температурами Кюри 495—530 °С. При этом величина J_s после первого нагрева увеличивается в 1,5—3,5 раза (рис. 4, в, г). По-видимому, носителем намагниченности в этих образцах являются однофазно окисленные титаномagnetиты (титаномagnetемы) [Печерский Диденко, 1995]. Как и для пород из скв. 4999, результаты термомагнитного анализа $J_s(T)$ подтверждаются и дополняются результатами $J_{rs}(T)$ (рис. 4, г, е). Кроме титаномagnetитов и титаномagnetитов в образцах 5-3, 5-5, 5-8 и 5-10 установлен гематит (рис. 4, б, см. вставку).

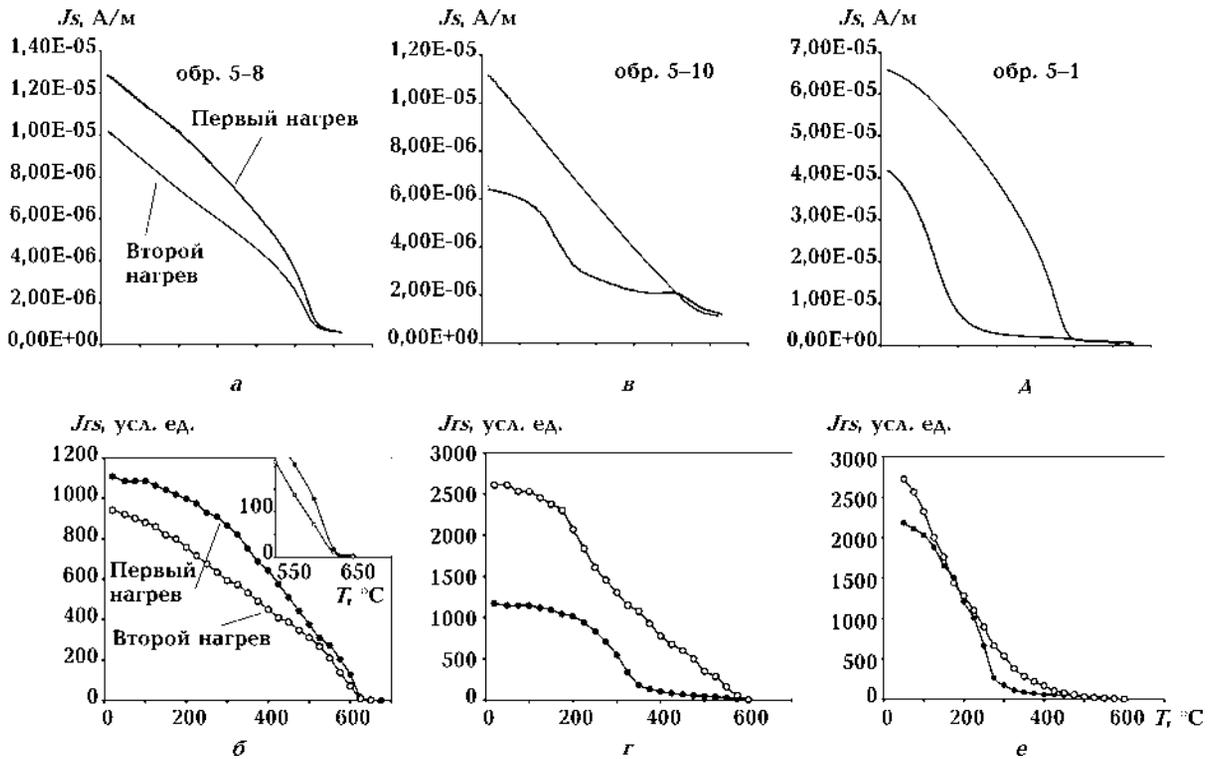


Рис. 4. Результаты термомагнитного анализа пород скв. 5112: а — кривые $J_s(T)$, однофазно окисленный титаномагнетит (базальт миндалекаменный); б — кривые $J_{rs}(T)$, тот же образец на вставке — увеличенный фрагмент диаграммы в температурном интервале выше 500 °С, иллюстрирующий наличие гематита; в — кривые $J_s(T)$, гетерофазно окисленный титаномагнетит (базанит); г — кривые $J_{rs}(T)$, тот же образец; д — кривые $J_s(T)$, гетерофазно окисленный титаномагнетит (измененный базальт); е — кривые $J_{rs}(T)$, тот же образец.

Доменное состояние частиц. Доменное состояние ферримагнитных зерен оценивалось по отношениям параметров Vcr/Vc и J_{rs}/J_s с помощью диаграммы Дея—Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002]. На рис. 5 видно, что все точки ложатся на теоретическую кривую для смеси однодоменных (ОД) и многодоменных зерен [Dunlop, 2002], при этом содержание однодоменных зерен, как правило, больше 30 % (псевдооднодоменное состояние, в терминологии [Day et al., 1977]). Лишь один образец (5-10) попадает в область, соответствующую промежуточному (между однодоменным и суперпарамагнитным) состоянию. Различий в доменном состоянии пород различного петрографического состава и разного состава магнитных минералов не выявлено.

Поведение магнитных характеристик. Распределение концентрационно-чувствительных магнитных характеристик по разрезам изученных скважин в целом типично для вулканогенно-осадочных толщ (см. рис. 2). Самые низкие значения концентрационно-чувствительных магнитных характеристик (k_{LF} , k_{fer} , J_{rs} , J_s) наблюдаются в туфах и туфо-

песчаниках, промежуточные значения характерны для миндалекаменных базальтов, а максимальные — для базанитов и измененных базальтов. Структурно-чувствительные магнитные характеристики (Vc , Vcr), напротив, демонстрируют пониженные значения в

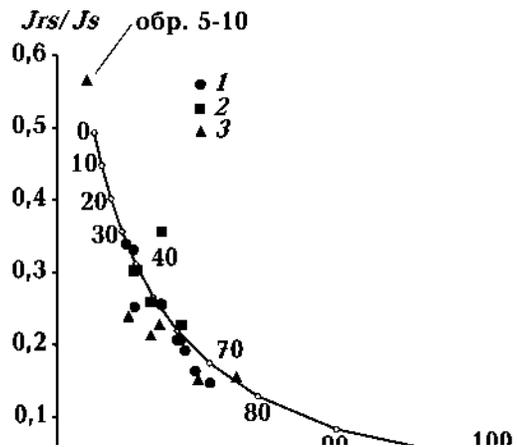


Рис. 5. Доменное состояние изученных образцов: 1 — базаниты; 2 — базальты; 3 — туфопесчаники и туфы; цифры на кривой — % многодоменных частиц.

базанитах и измененных базальтах. Параметр S в базанитах и измененных базальтах, как правило, равен единице, тогда как в миндалекаменных базальтах, туфопесчаниках и туфах $S < 1$. Значения петромагнитных параметров, характеризующих магнитное последствие (SPM , ΔJrs , Fd), также возрастают в горизонтах базанитов и измененных базальтов и снижаются в миндалекаменных базальтах, туфопесчаниках и туфах. Аналогичным образом ведет себя и ЭДС переходного процесса (см. рис. 2).

Следует отметить, что изменения параметров, измеренных с помощью магнитных методов и индукционной системы на образцах из скв. 5112, носят более резкий и нерегулярный характер по сравнению с образцами из скв. 4999, но амплитуда этих изменений по многим параметрам (k_{LF} , J_s , k_{par} , ΔJrs , ЭДС) несколько меньше.

Обсуждение результатов. Сравнение характера изменений ЭДС переходного процесса и петромагнитных характеристик показывает, что максимальный эффект магнитного последствия по величине ЭДС, наблюдаемый в образцах базанитов из скв. 4999 (глубина 106 м), совпадает с резким увеличением параметров магнитной вязкости ΔJrs и Fd в том же интервале глубин. В этом же интервале увеличиваются магнитная восприимчивость и намагниченность насыщения и уменьшается коэрцитивная сила. Отметим еще два принципиальных момента: в этом интервале отсутствуют магнитомягкие минералы ($S=1$), а параметр SPM не испытывает существенных изменений. Наиболее вероятной представляется следующая интерпретация полученных результатов: основной вклад в электромагнитное поле магнитного последствия вносят частицы, по размерам близкие к границе суперпарамагнитного (СП) и стабильного однодоменного состояний. Относительно резкое увеличение параметров Fd и ΔJrs позволяет предполагать, что время релаксации зерен, участвующих в этом процессе, ограничено сверху значением для нижней границы суперпарамагнитного состояния (< 100 с) [Dunlop, 1973], а снизу — временем между измерениями Jrs на коэрцитивном спектрометре, равным 50 мс [Jasonov et al, 1998]. Зерна с меньшими временами релаксации, судя по значениям параметра SPM (интегральная характеристика суперпарамагнитных зерен [Encyclopedia ..., 2007]), в этом процессе практически не участвуют. Ограниченный диапазон времен релаксации дает возможность оценить диапазон размеров зерен, ответственных за

данный механизм магнитного последствия. Поскольку состав магнитных зерен в исследуемом интервале глубин близок к магнетиту, можно использовать логарифмическую зависимость между объемом магнитного зерна магнетита и временем релаксации намагниченности [Yoshida et al., 1994]. Время релаксации, равное 0,05 с, дает нижнюю оценку размера зерна в 0,0254 мкм. С учетом того что критический размер СП/ОД состояний оценивается величиной 0,029 мкм [Нагата, 1965], диапазон размеров зерен, обеспечивающих основной вклад магнитного последствия в индукционные переходные характеристики, оценивается как довольно узкий (0,0254—0,029 мкм). Этот вывод с позиций теории однодоменных частиц [Нагата, 1965] хорошо объясняет рост магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения в соответствующих интервалах при одновременном снижении коэрцитивной силы (см. рис. 2). Дополнительным аргументом является снижение k_{par} в интервалах увеличения магнитной восприимчивости и J_s , свидетельствующее о том, что суперпарамагнитные частицы при интерпретации данных магнитного гистерезиса не были включены в «парамагнитный фон».

Следует оговориться, что данный интервал разреза представлен наименее измененными породами (базанитами), о чем свидетельствуют близкие к обратимым кривые $J_s(T)$ и значения $S=1$. Таким образом, явление магнитного последствия здесь связано с первично-магматическими зернами магнитных минералов.

Иная картина наблюдается для пород, вскрытых скв. 5112. Изменения ЭДС по разрезу здесь, по крайней мере, в 3 раза ниже, чем для образцов из скв. 4999. Горизонты базанитов в скв. 5112 также отмечаются здесь повышенными значениями ЭДС, однако самые высокие ее значения соответствуют измененным базальтам в верхней части разреза (см. рис. 2). Все интервалы повышенной ЭДС, как и в скв. 4999, характеризуются значениями $S=1$, что указывает на отсутствие в этих интервалах магнитомягких минералов, в частности гематита. Последний в базальтовых толщах, скорее всего, является конечным продуктом окисления титаномагнетитов и титаномаггемитов и, таким образом, представляет собой вторичный продукт, наследующий размеры исходных ферримагнитных зерен [Печерский, Диденко, 1995]. Поскольку критический размер однодоменного состояния для гематита существенно выше, чем у титаномаггемитов и маггемита,

новообразованный гематит находится преимущественно в суперпарамагнитном состоянии [Печерский, 1985]. Однако даже в этом случае эффект магнитного последействия для суперпарамагнитных зерен гематита невелик в силу существенных различий в k_{LF} и J_s гематита и минералов магнетит-титаномагнетитового ряда [Dunlop, Ozdemir, 1997].

Отметим, что повышенные значения ЭДС в породах скв. 5112 не сопровождаются увеличением параметров k_{LF} и J_s (см. рис. 2), лишь величина B_c в этих интервалах достигает самых низких значений (<10 мТл). При этом значения параметров ΔJ_s и Fd (за исключением характеризующих верхний горизонт) практически не изменяются по разрезу, что свидетельствует об отсутствии магнитных зерен с временами релаксации более 50 мс.

Наличие более мелких суперпарамагнитных зерен четко фиксируется по изменениям параметров SPM и эффективному размеру магнитного зерна («Size» на рис. 2), демонстрирующих прямую корреляцию с ЭДС. Если корреляция изменений параметра SPM (как интегральной характеристики суперпарамагнитных зерен) с ЭДС вполне понятна, то рост эффективного размера зерна на интервалах с высоким содержанием мелких суперпарамагнитных зерен требует пояснения. Как известно, отношение k_{fer}/J_s может служить для оценки эффективного размера зерна только в случае многодоменных и однодоменных зерен. Наличие мелких суперпарамагнитных частиц нарушает эту закономерность [Thompson, Oldfield, 1986], т. е. резкое повышение k_{fer}/J_s в данном случае как раз свидетельствует об этом.

Наиболее вероятным представляется, что мелкие суперпарамагнитные зерна не вносят существенного вклада в ЭДС переходных процессов. В тех горизонтах, где имеются только мелкие суперпарамагнитные частицы, ЭДС в 2—6 раз ниже, чем в горизонтах с крупными суперпарамагнитными частицами (см. рис. 2). Например, в измененных базальтах, вскрытых скв. 5112, в которых фиксируются наиболее крупные (по значениям Fd) суперпарамагнитные частицы, ЭДС в 1,8 раза выше, чем в нижележащем горизонте базанитов, где такие зерна отсутствуют.

В отличие от пород, вскрытых скв. 4999, породы скв. 5112 претерпели существенные вторичные изменения. Состав магнитных минералов этих пород свидетельствует о неравномерном окислении исходных ферромагнетиков

и, таким образом, об уничтожении первично-магматических минералов и образовании вторичных магнитных зерен. Эти различия в сохранности ферромагнитных зерен и обуславливают особенности проявления магнитного последействия на изученных объектах. Слабоизмененные первично-магматические ферромагнетики в породах, вскрытых скв. 4999, обеспечивают максимальный эффект магнитного последействия за счет относительно крупных суперпарамагнитных частиц с узким диапазоном размеров зерен вблизи границы СП—ОД-состояний. Именно этот эффект проявляется при измерениях во временной области в методе переходных процессов. В сильно измененных породах, вскрытых скв. 5112, такие зерна, в основном, отсутствуют, тогда как вклад мелких суперпарамагнитных зерен с временами релаксации менее 0,05 с в индукционные переходные характеристики составляет не более 30 % по сравнению с вкладом, создаваемым вследствие релаксации намагниченности крупных зерен.

Выводы. Наибольший вклад в эффект магнитного последействия в индукционные переходные характеристики вносят наименее измененные породы, в рассматриваемом случае это массивные базаниты, магнитные минералы которых менее всего окислены.

Эффект магнитного последействия определяется преимущественно наличием суперпарамагнитных частиц высокожелезистых титаномагнетитов, близких по составу к магнетиту, размеры которых находятся в достаточно узком интервале (наиболее вероятно 0,0254—0,029 мкм). Времена релаксации таких частиц составляют от 0,05 до 100 с. Наличие частиц такого размера уверенно определяется по повышению магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения с одновременным снижением коэрцитивной силы.

Вклад релаксации намагниченности более мелких суперпарамагнитных зерен (времена релаксации менее 0,05 с, размер менее 0,0254 мкм) в индукционные переходные характеристики примерно в 3 раза ниже. Наличие мелких частиц не сопровождается ростом магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения, хотя коэрцитивная сила в таких интервалах снижается даже больше, чем для крупных (0,0254—0,029 мкм) суперпарамагнитных частиц. Диагностика таких частиц возможна по повышению параметра SPM и увеличению эффективного размера магнитного зерна.

Список литературы

- Антонов Е. Ю., Кожевников Н. О., Максимов П. С., Гомульский В. В. Импульсная индуктивная электроразведка геологических сред с вязкостью // Материалы Пятой всерос. школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли — ЭМЗ-2011. — В 2 кн. — СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2011. — Кн. 2. — С. 11—14.
- Кожевников Н. О., Антонов Е. Ю. Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. — 2008. — 49, № 3. — С. 262—276.
- Митрофанов Е. А., Рогова В. П., Аввакумов В. В., Кучеренко А. А., Нестерова Н. В. Минералогическо-геохимические особенности неогенового уранового месторождения Источное (Амалатское плато базальтов) // Изв. ИрГУ. Сер. Науки о Земле. — 2010. — 3, № 2. — С. 126—138.
- Нагата Т. Магнетизм горных пород. — Москва: Мир, 1965. — 348 с.
- Печерский Д. М. Петромагнетизм и палеомагнетизм. — Москва: Наука, 1985. — 127 с.
- Печерский Д. М., Дигенко А. Н. Палеоазиатский океан. — Москва: ОИФЗ РАН, 1995. — 298 с.
- Рассказов С. В., Лямина Н. А., Черняева Г. П., Лузина И. В., Руднев А. Ф., Резанов И. Н. Стратиграфия кайнозой Витимского плоскогорья: феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. — Новосибирск: Гео, 2007. — 193 с.
- Трухин В. И. Введение в магнетизм горных пород. — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1973. — 272 с.
- Day R., Fuller M., Schmidt V. A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // Phys. Earth Planet. Inter. — 1977. — 13. — P. 260—267.
- Dunlop D. J. Superparamagnetic and Single-Domain Threshold Sizes in Magnetite // J. Geophys. Res. — 1973. — 78, № 11. — P. 1780—1793.
- Dunlop D. J. Theory and application of the Day plot (M-rs/M-s versus H-cr/H-c) // J. Geophys. Res. S. Solid Earth. — 2002. — 107, iss. B3. — P. 2046—2067.
- Dunlop D. J., Ozdemir O. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. — New York; London; Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1997. — 573 p.
- Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism / Eds D. Gubbins, E. Herrero-Bervera. — Dordrecht: Springer-Verlag, 2007. — 1054 p.
- Jasonov P. G., Nourgaliev D. K., Bourov B. V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // Geologica Carpathica. — 1998. — 49, № 3. — P. 224—226.
- Thompson R., Oldfield F. Environmental Magnetism. — London: Allen and Unwin, 1986. — 227 p.
- Yoshida M., Fujiwara Y., Khadim I. M., Ali M., Ahmad M. N. Magnetic Approaches to Geological Sciences. Part I: Paleomagnetism and its Applications. — Islamabad, Pakistan: Geoscience Lab., GSP and JIGA, 1994. — 284 p.