

## **ПРОЯВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ ПОРОД ТРАППОВОЙ ФОРМАЦИИ ПРИ РАБОТАХ МЕТОДОМ ЗСБ НА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЕ**

### ***Николай Олегович Кожевников***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

### ***Юрий Александрович Агафонов***

Иркутское электроразведочное предприятие, 664011, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, кандидат технических наук, генеральный директор, тел. (3952)78-01-84, e-mail: aua@ierp.ru

### ***Евгений Юрьевич Антонов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, доцент, зав. лабораторией геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

### ***Игорь Владимирович Буддо***

Иркутское электроразведочное предприятие, 664011, Россия, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, тел. (3952)78-01-84, e-mail: biv@ierp.ru

На поздних временах магнитная вязкость пород трапповой формации Сибирской платформы оказывает преобладающее влияние на индукционные переходные характеристики. Это затрудняет или делает невозможным их интерпретацию без учета магнитной вязкости. Идентификации эффектов магнитной вязкости способствует применение многоразносных установок.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, траппы, метод ЗСБ, магнитная вязкость.

## **THE EFFECT OF SIBERIAN FLOOD BASALT MAGNETIC VISCOSITY ON THE TEM SURVEY DATA**

### ***Nikolay O. Kozhevnikov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Professor, Principal Scientist, tel. (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

### ***Yury A. Agafonov***

Irkutsk Electroprospecting Company, 664011, Russia, Irkutsk, Rabochaya Str. 2a, Ph. D., Director, tel. (3952)78-01-84, e-mail: aua@ierp.ru

### ***Evgeniy Yu. Antonov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

**Igor V. Buddo**

Irkutsk Electroprospecting Company, 664011, Russia, Irkutsk, Rabochaya Str. 2a, Ph. D., Principal Geophysicist, tel. (3952)78-01-84, e-mail: biv@ierp.ru

Both field survey and forward modeling indicate that magnetic viscosity of the Siberian platform flood basalt has a determining effect on the late time TEM response, which makes difficult or even impossible interpretation of TEM data without regard for magnetic viscosity. The use of multi-offset arrays is favorable for identification of magnetic viscosity effect in the TEM data.

**Key words:** Siberian platform, flood basalt, TEM sounding method, magnetic viscosity.

Магнитная вязкость – одно из фундаментальных свойств ферромагнитных материалов. Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферромагнетиков по отношению к изменениям напряженности внешнего магнитного поля. В горных породах проявления магнитной вязкости связаны преимущественно с установлением и релаксацией намагниченности ультрадисперсных частиц ферромагнитных минералов – явлением суперпарамагнетизма.

Времена релаксации намагниченности суперпарамагнитных (СПМ) частиц ферромагнитных минералов составляют от  $10^{-9}$  до  $10^2$  и более секунд. В указанный временной интервал попадает диапазон времен регистрации, устанавливаемой ЭДС в геофизических методах зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и переходных процессов (МПП), поэтому релаксация намагниченности суперпарамагнитных частиц оказывает влияние на индукционные переходные характеристики [3].

Результирующий сигнал в приемной петле представляет сумму ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , индуцируемых релаксацией намагниченности и вихревых токов соответственно. ЭДС  $e_1$  спадает обратно пропорционально первой степени времени  $t$ :  $e_1(t) \propto t^{-1}$ . ЭДС  $e_2$  убывает намного быстрее. Так, для однородного проводящего полупространства  $e_2(t) \propto t^{-5/2}$ . Поэтому с течением времени относительный вклад  $e_1(t)$  в суммарный сигнал неуклонно возрастает. Начиная с некоторого момента  $t_1$  влияние релаксации намагниченности становится преобладающим. Этот момент зависит от пространственного распределения удельной электропроводности и СПМ частиц, а также от размеров генераторно-приемной установки. При прочих равных условиях он наступает тем позже, чем больше разнос (размер) генераторно-приемной установки.

Влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики чаще всего отмечается при работе с установками небольших размеров. Это связано с тем, что в этом случае уже на сравнительно ранних временах сигнал индукционного становления спадает до уровня шумов, тогда как ЭДС, индуцируемая релаксацией намагниченности, превышает этот уровень. Что касается установок большого размера, то еще недавно качество измерений переходных характеристик на поздних временах было недостаточным для того, чтобы «нюансы» измеряемого сигнала могли быть с уверенностью идентифицированы как проявления магнитной вязкости.

В последнее время «нюансы» все чаще отмечаются при работе с генераторными петлями большого размера и/или на больших разностях благодаря использованию мощных источников тока, прецизионных средств измерения, новых эффективных алгоритмов и программ для извлечения полезного сигнала из смеси «сигнал + шум».

При изучении геоэлектрического разреза юга Сибирской платформы широко применяется схема измерений, показанная в нижней части рис. 1, а: на каждом пункте зондирования выполняются пятью установками – одной соосной и четырьмя разнесенными, при этом положение генераторной петли остается неизменным. Длина стороны генераторной петли обычно составляет 400-600 м, разности ( $r$ ) – 0 (соосная установка), 500 и 1000 м.

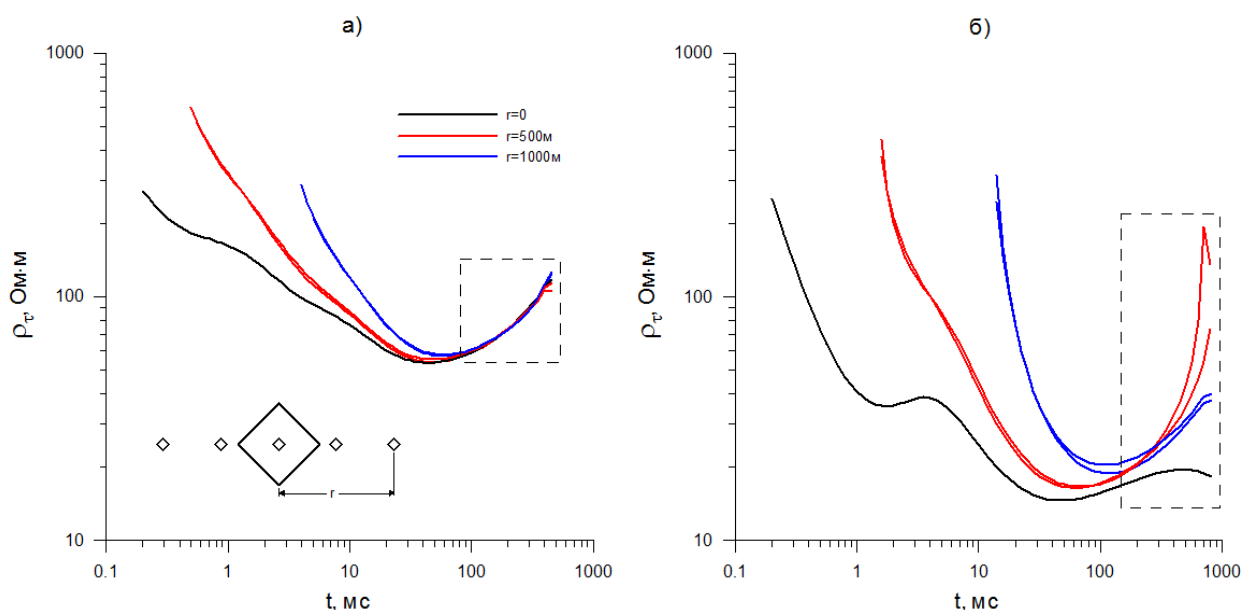


Рис. 1. Кривые кажущегося удельного сопротивления, измеренные на нескольких разностях: а) в пределах Ангаро-Ленской ступени; б) на участке, где верхняя часть разреза сложена породами трапповой формации

В большинстве случаев кривые ЗСБ, измеренные многоразносными установками на юге Сибирской платформы, на поздних временах совпадают. На рис. 1, а показаны кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_\tau$  для одного из участков в пределах Ангаро-Ленской ступени. Размер генераторной петли составлял 500 м x 500 м, приемной – 18 м x 18 м. На ранних временах переходные характеристики расходятся, однако наблюдается симметрия: при одинаковом разноразности зарегистрированы идентичные кривые  $\rho_\tau$ .

Рис. 1, б иллюстрирует ситуацию, впервые отмеченную в работе [1] и наблюдающуюся при работах методом ЗСБ на участках, где верхняя часть разреза сложена породами трапповой формации (особенно туфами). В отличие от рассмотренного выше случая, в области поздних времен кривые  $\rho_\tau$ , измеренные разнесенными установками, расходятся. При этом правая ветвь кривой  $\rho_\tau$  для соосной установки располагается ниже по отношению к правым ветвям кривых

для установки с разномом 1000 м, а те, в свою очередь, – ниже правых ветвей кривых  $\rho_{\tau}$  для  $r=500$  м. С течением времени расхождение между значениями  $\rho_{\tau}$  при разных разносах все быстрее увеличивается. Индивидуальная инверсия поздних участков кривых ЗСБ, а тем более их совместная инверсия, в рамках модели горизонтально-слоистой проводящей среды не представляется возможной.

Вследствие высокого содержания СПМ зерен породы трапповой формации характеризуются интенсивными проявлениями магнитной вязкости [1, 2]. Поэтому можно предположить, что именно магнитная вязкость является причиной отмеченного расхождения. Это предположение согласуется с результатами математического моделирования индукционных переходных характеристик (рис. 2). Расчеты проводились в частотной области, после чего осуществлялась трансформация во временную область. Влияние магнитной вязкости учитывалось путем использования комплексной, частотно-звисимой магнитной восприимчивости

$$\kappa(\omega) = \Delta\kappa \left[ 1 - \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \cdot \ln \frac{1 + j\omega\tau_2}{1 + j\omega\tau_1} \right],$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $j=(-1)^{1/2}$ ;  $\tau_1, \tau_2$  – нижняя и верхняя границы диапазона времен релаксации;  $\Delta\kappa$  – разница между значениями магнитной восприимчивости на низкой ( $\omega \ll 1/\tau_2$ ) и высокой ( $\omega \gg 1/\tau_1$ ) частотах. Расчеты выполнены для  $\Delta\kappa$  в диапазоне от 0 (отсутствие магнитной вязкости) до  $10^{-2}$  ед. СИ (сильное проявление магнитной вязкости). При выполнении расчетов было принято, что  $\tau_1=10^{-6}$  с,  $\tau_2=10^6$  с.

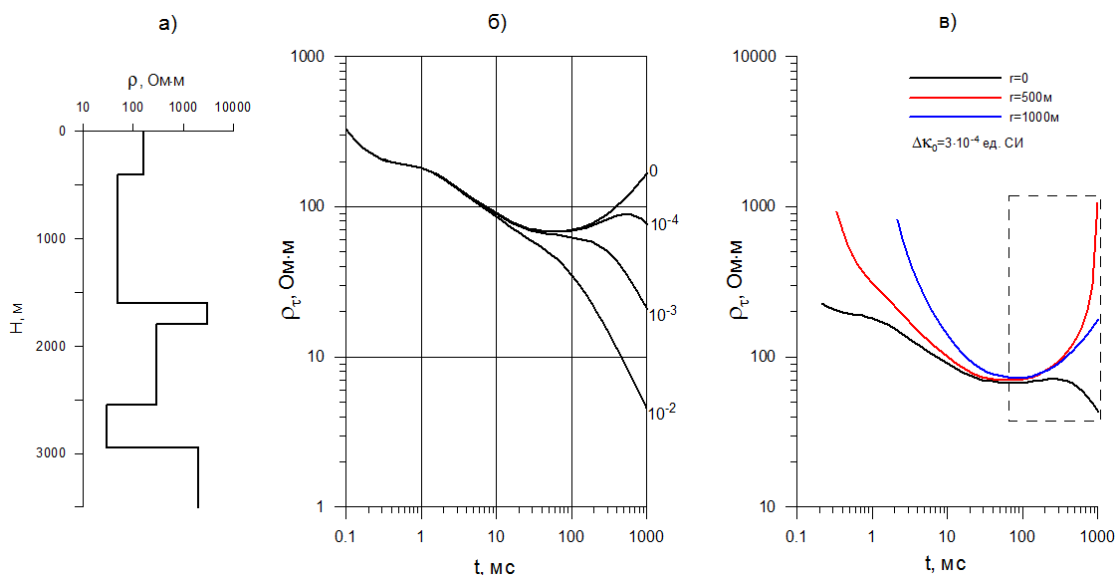


Рис. 2. Геоэлектрическая модель осадочного чехла Сибирской платформы, типичная для участков, где верхняя часть разреза представлена туфами (а); кривые  $\rho_{\tau}$ : для соосной (б) и многоразносной (в) установок. Шифр кривых на рис. 2, б –  $\Delta\kappa$ , ед. СИ

На рис. 2, а показана геоэлектрическая модель осадочного чехла Сибирской платформы, типичная для участков, где верхняя часть разреза представлена

туфами. Рис. 2, б иллюстрирует влияние магнитной вязкости верхнего слоя на кривые кажущегося удельного сопротивления для соосной установки. Как можно видеть, при  $\Delta k \geq 10^{-3}$  ед. СИ с течением времени явно наблюдается неуклонное понижение значений  $\rho_{\tau}$ . На поздних временах общий вид и взаимное расположение модельных (рис. 2, в) и полевых (см. рис. 1, б) кривых  $\rho_{\tau}$  для многоразносной установки настолько похожи, что это не оставляет сомнений по поводу обсуждаемых эффектов: они являются не чем иным, как проявлением магнитной вязкости.

## ВЫВОДЫ

Магнитная вязкость пород трапповой формации оказывает сильное влияние на индукционные переходные характеристики. С увеличением временной задержки это влияние неуклонно и все быстрее возрастает. Проявления магнитной вязкости представляют собой геологическую помеху, затрудняющую интерпретацию правых ветвей переходных характеристик в рамках модели проводящей немагнитной среды. Это препятствует изучению геоэлектрического разреза в интервале больших глубин.

В качестве одного из возможных путей решения этой проблемы можно предложить развитие методов решения прямой и обратной задач импульсной индуктивной электроразведки с учетом магнитной вязкости, т. е. в рамках модели проводящей магнитовязкой среды. Принципиальная возможность такого подхода проиллюстрирована в работе [4]. Непременным условием его реализации даже в простейшем случае горизонтально-слоистой среды является использование многоразносных установок, при этом разности должны быть соизмеримы с глубиной залегания и мощностью магнитовязкого слоя.

Другой возможный путь – использования установок, минимизирующих взаимную индуктивность между генераторной и приемной петлями [3]. Однако его реализация предполагает проведение большого числа наблюдений, что снижает перспективы использования такого подхода при проведении массовых съемок методом ЗСБ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаркин А.К., Бубнов В.М., Крыжановский В.А., Тарло Н.Н. Магнитная вязкость горных пород – новый осложняющий фактор метода ЗСБ // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. - Новосибирск: СНИИГГиМС, 1988. - С. 19-26.
2. Кожевников Н.О., Снопков С.В. Магнитная вязкость траппов и ее связь с аномалиями электромагнитного поля в методе переходных процессов (Якутская кимберлитовая провинция) // Геология и геофизика. - 1995. - Т. 36. - № 5. - С. 91-102.
3. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. - 2008. - Т. 49. - № 3. - С. 262-276.
4. Стогний В.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Исследование магнитной вязкости горных пород в условиях их естественного залегания с помощью импульсной индуктивной электроразведки // Геология и геофизика. - 2010. - Т. 51. - № 11. - С. 1565-1575.

© Н. О. Кожевников, Ю. А. Агафонов, Е. Ю. Антонов, И. В. Буддо, 2016