

Снижение влияния магнитной вязкости на результаты метода глубинных нестационарных электромагнитных зондирований

М.В. Шарлов¹, Н.О. Кожевников², Е.Ю. Антонов²

¹ООО «СИГМА-ГЕО», sharlov@sigma-geo.ru

²ИНГГ СО РАН, kozhevnikovno@ipgg.sbras.ru

АННОТАЦИЯ

Проявления магнитной вязкости пород трапповой формации на юге Сибирской платформы осложняют данные метода зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопоисковых задач. С целью повышения информативности и достоверности данных нестационарных электромагнитных зондирований в условиях проявления эффектов магнитной вязкости предложен подход для снижения влияния магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики. Подход основан на возможности использования результатов измерений многоразносными установками для определения вклада, который релаксация намагниченности вносит в суммарную переходную характеристику.

Ключевые слова: Магнитная вязкость, суперпарамагнетизм, зондирование становлением поля в ближней зоне.

ВВЕДЕНИЕ

Юг Сибирской платформы является территорией, перспективной с точки зрения наличия значительных запасов углеводородов. Это обуславливает проведение геолого-геофизических исследований, в том числе методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ).

Осложняющим фактором при проведении наземных геофизических исследований на севере Иркутской области и Красноярского края является трапповый магматизм позднепалеозойско-раннемезозойского времени (Пермяков и др., 2012; Битнер и Поздняков, 2017).

Излившаяся на поверхность туфоловая толща, а также интрузии траппов осложняют данные сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ), что затрудняет интерпретацию сейсмических записей и снижает качество структурных построений.

Характерной особенностью пород трапповой формации является магнитная вязкость (МВ). Индукционные переходные характеристики, измеренные на участках, где присутствуют породы трапповой формации, часто осложнены влиянием магнитной вязкости. Влияние магнитной вязкости выражается в аномальном замедлении спада ЭДС на поздних временах, что затрудняет или делает невозможным изучение глубинного строения геологического разреза. Это делает актуальным разработку способов обработки материалов ЗСБ, позволяющих ослабить влияние магнитной вязкости.

В данной работе мы, основываясь на результатах математического моделирования, демонстрируем подход, позволяющий ослабить влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики и повысить достоверность интерпретации данных глубинных ЗСБ, осложненных влиянием МВ.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Магнитная вязкость – одно из проявлений ферромагнетизма. В индуктивной электроразведке эффекты магнитной вязкости связаны с релаксацией намагниченности присутствующих в горных породах ультрадисперсных частиц ферромагнитных минералов — явлением суперпарамагнетизма (СПМ) (Buselli, 1982; Кожевников, Снопков, 1990, 1995).

Влияние магнитной вязкости проявляется в виде медленно спадающей ЭДС, скорость убывания которой обратно пропорциональна первой степени времени $1/t$ (далее в тексте ЭДС_{МВ}).

В присутствии горных пород с высоким содержанием СПМ частиц, влияние магнитной вязкости на индукционные характеристики становится заметным или даже преобладающим по сравнению с влиянием вихревых токов, зависящим от электропроводности среды.

Как известно (Кожевников и Антонов, 2008; Кожевников и др., 2012), становление вихревых токов и релаксация намагниченности протекают независимо. Это означает, что для этих

процессов применяется принцип суперпозиции: результирующая ЭДС в приемной петле представляет сумму ЭДС, индуцированных релаксацией намагниченности и вихревыми токами. В случае горизонтально-слоистой среды для соосной установки полярность ЭДС_{МВ} совпадает с полярностью ЭДС, индуцируемой вихревыми токами. Однако для разнесенной установки полярность ЭДС_{МВ} противоположна полярности ЭДС, создаваемой за счет «номального» индукционного становления. Для разнесенной установки увеличение расстояния между питающей и приемной петлями снижает проявление магнитной вязкости, так как при этом уменьшается взаимная индуктивность между генераторной и приемной петлями (Кожевников и Антонов, 2008, 2018).

ИЗВЕСТНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ДАННЫЕ ЗСБ

Обычно в методе ЗСБ проявление магнитной вязкости рассматривают как геологическую помеху, затрудняющую интерпретацию переходных характеристик в терминах «нормальной» электропроводности. Так, формальная интерпретация медленно убывающей ЭДС приводит к появлению не существующих в реальности слоев очень низкого удельного сопротивления (The geophysics ..., 1980).

Известны способы, позволяющие снизить или учесть влияние МВ на индукционные переходные характеристики. Один из них (Захаркин и Бубнов, 1995) заключается в том, что для изучения верхней части геологического разреза используются данные соосной установки, а для изучения глубинного строения – установки с разнесенными петлями. Недостатком такого способа является типичная для несимметричных установок проблема, связанная с неопределенностью точки записи.

Другой способ, предложенный в работе (Кожевников и Антонов, 2009), основан на принципе геометрического зондирования. Измерив на одном месте переходные процессы с помощью установок разных размеров, можно наряду с распределением электропроводности с глубиной, найти вертикальное распределение параметров, характеризующих магнитную вязкость.

Одним из серьезных недостатков, присущих обоим способам, является необходимость в сложной системе наблюдений. Это влечет увеличение стоимости съемок, что препятствует массовому использованию этих способов в производственных работах.

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МНОГОРАЗНОСНЫХ УСТАНОВОК

При постановке нефтегазопроисловых исследований методом ЗСБ широко используются многоразносные установки, с помощью которых от одной генераторной петли регистрируются сигналы, индуцируемые в соосной и нескольких выносных приемных петлях (рисунок 1).

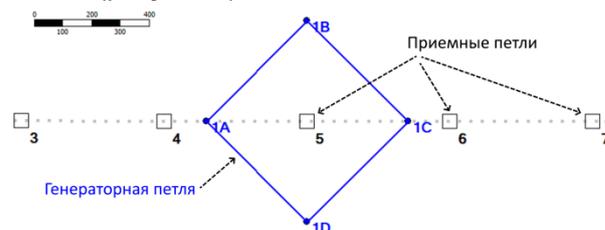


Рисунок 1. Установка с соосной и четырьмя выносными приемными петлями.

По сравнению с традиционной многоразносная установка обеспечивает более высокую производительность, высокую плотность наблюдений, возможность диагностировать и интерпретировать данные ЗСБ с проявлениями индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) или магнитной вязкости (Kompaniets and Kozhevnikov, 2018).

На рисунке 2 приведены полевые кривые кажущегося сопротивления $\rho_t(t)$, осложненные влиянием магнитной вязкости.

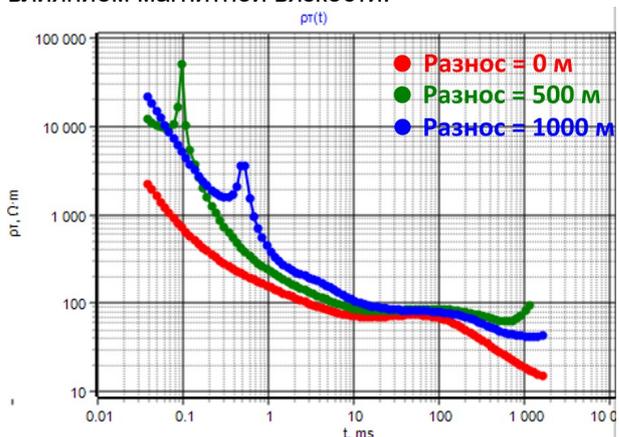


Рисунок 2. Кривые $\rho_t(t)$ с различной, в зависимости от разноса, степенью проявления магнитной вязкости.

Как уже упоминалось, ЭДС, индуцируемая релаксацией намагниченности, в выносных приемных петлях по сравнению с соосной тем меньше, чем больше расстояние между центрами генераторной и приемной петель (разнос). Синяя кривая на рисунке 2 получена от разноса 1000 м и является наименее подверженной влиянию МВ. Заметное влияние МВ на таком разнесе будет отмечаться на более

позднем времени становления, значительно превышающем конечное время в измеренной полевой кривой. Поэтому результирующая ЭДС, полученная на данном разnose, на поздних временах может считаться референтной для меньших разносов установки. Значения сопротивления для соосной приемной петли (красный график на рисунке 2) на времени более 100 мс занижены относительно референтной кривой, тогда как для выносной приемной петли с разносом 500 м (зеленый график на рисунке 2) – завышены.

Для снижения влияния магнитной вязкости мы использовали подход, заключающийся в расчете ЭДС_{МВ} с последующим ее вычитанием из наблюдаемых переходных характеристик. Этот подход опирается на следующие факты:

- ЭДС_{МВ} является аддитивной по отношению к ЭДС, индуцируемой вихревыми токами;
- ЭДС_{МВ} убывает обратно пропорционально времени: $ЭДС_{МВ} \propto 1/t$;
- Вклад релаксации намагниченности в результирующую ЭДС, индуцируемую в приемной петле, минимален при максимальном разносе. Поэтому ЭДС, измеренная от максимального разноса, может служить референтной при определении и вычитании ЭДС_{МВ} из результирующей ЭДС, получаемой на меньшем разносе установки ЗСБ;
- Необходимо близкое к горизонтально-слоистому строение изучаемого разреза для того, чтобы референтный отклик на поздних временах представлял асимптотическое приближение спада ЭДС в пределах всей зондирующей установки.

Данный подход был реализован в программном пакете TEM-Processing (Sharlov et al., 2018) в виде алгоритма совместной обработки данных многоразносной установки. Алгоритм заключается в подборе параметров ЭДС_{МВ} для каждого из разносов установки таким образом, чтобы при вычитании её из измеренной ЭДС, осложненной влиянием МВ, результирующая ЭДС на поздних временах имела наименьшее среднеквадратичное расхождение с референтной ЭДС, измеренной от установки с максимальным разносом.

Поскольку длительность импульсов тока в генераторной петле влияет на скорость убывания ЭДС_{МВ} (Dabas and Skinner, 1993), расчет ЭДС_{МВ} выполняется с учетом этой длительности. В ходе расчета определяются такие параметры, как начальное (при $t \rightarrow 0$) значение и полярность ЭДС_{МВ}, а также уточняется показатель степени в функции, описывающей убывание ЭДС_{МВ}.

Функция, описывающая ЭДС_{МВ}, гладкая и монотонно убывающая. Если параметры функции определены правильно, результат ее вычитания из измеренной ЭДС представляет собой ЭДС, индуцируемую в приемной петле вихревыми токами, которая контролируется распределением удельной электропроводности.

ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ

Для верификации работы алгоритма мы провели численный эксперимент. Он включал: моделирование переходных характеристик с учетом магнитной вязкости для нескольких геоэлектрических моделей, определение магнитовязкой составляющей суммарного сигнала, вычитание этой составляющей из результирующей переходной характеристики, инверсию разностной ЭДС на основе модели горизонтально-слоистой проводящей среды, сопоставление найденной таким образом модели исходной.

Сначала Н.О. Кожевников сформировал три исходные модели с удельными сопротивлениями и параметрами магнитной вязкости, типичными для одной из площадей исследований.

После этого Е.Ю. Антонов с использованием оригинальной программы рассчитал модельные переходные характеристики с учетом магнитной вязкости. Для каждой из трех моделей переходные характеристики рассчитывались для разносов: 0, 500 и 1500 метров. Переходные характеристики для разноса 1500 м, как наименее подверженные влиянию магнитной вязкости, при дальнейшей обработке использовались в качестве референтных.

Для учета влияния погрешностей измерения на эффективность алгоритма к модельным данным добавлялись полевые записи электромагнитных помех. После этого М.В. Шарлов с помощью стандартного графа программы TEM-Processing выполнил обработку этих данных. В результате были построены квазиэкспериментальные переходные характеристики. Следующий шаг заключался в их обработке с помощью алгоритма для снижения влияния магнитной вязкости. На рисунках 3А, 3В, 3С приведены квазиэкспериментальные кривые $\rho(t)$, осложненные влиянием магнитной вязкости. Ниже, на рисунках 3D, 3E, 3F показаны соответствующие кривые $\rho(t)$ для переходных характеристик, найденных путем вычитания ЭДС_{МВ} из результирующей ЭДС.

Как видно из рисунка 3, степень проявления магнитной вязкости зависит от модели. Для

моделей 2 и 3 на поздних временах при разnose 500 м наблюдается смена знака ЭДС (оранжевый цвет кривых $\rho\tau(t)$ на рисунке 3В и 3С).

Несмотря на разную степень влияния магнитной вязкости, с помощью верифицируемого алгоритма удалось определить ЭДС_{МВ}, после вычитания которой из суммарной ЭДС кривые $\rho\tau(t)$ на всех разносах асимптотически сближаются, как и должно быть в случае горизонтально-слоистой среды.

На следующем этапе верификации М.В. Шарлов выполнил инверсию «освобожденных» от эффектов магнитной вязкости индукционных переходных характеристик в рамках модели горизонтально-слоистой проводящей среды. Выполняя инверсию, интерпретатор не располагал априорной информацией об исходных геоэлектрических моделях. Данные для соосной установки и разнесенной установки с разномом 500м интерпретировались независимо; инверсия данных для разноса 1500 м не проводилась, так как данный разнос был референтным.

Среднеквадратическое отклонение между подбираемой ЭДС, «освобожденной» от влияния МВ и модельной ЭДС, полученной в результате инверсии составило 0.5 – 0.6 % для всех подбираемых кривых. Исходные и восстановленные модели приведены на рисунке 4. Хотя распределение мощностей геоэлектрических слоев в подобранных моделях было получено с некоторой погрешностью, положения проводящих горизонтов в разрезе (на глубинах около 300 и 3000 м) определены с погрешностью, приемлемой для результатов глубинных работ.

На заключительном этапе эксперимента были использованы мощности слоев, взятые с исходных геоэлектрических моделей. В результате удалось улучшить подбор удельного электрического сопротивления всех слоев для каждой модели. Среднеквадратическое отклонение по результатам инверсии уменьшилось и составило около 0.4%.

Выводы

Результаты численного эксперимента свидетельствуют об эффективности предлагаемого подхода для снижения влияния магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики.

Применение обсуждаемого подхода не связано с дополнительными затратами, поскольку для его реализации достаточно данных, получаемых обычной многоканальной установкой.

К ограничениям подхода относятся: горизонтальное (или близкое к тому) залегание

геологических слоев, а также необходимость измерений на больших (порядка 1000 – 1500 м) разносах для получения референтных переходных характеристик.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны И.В. Буддо за помощь в формировании исходных геоэлектрических моделей.

ЛИТЕРАТУРА

Битнер АК, Поздняков ВА 2017 Новые технологии геологической разведки. Месторождения углеводородов Сибирской платформы и прилегающих территорий: монография – Красноярск: СФУ, 2017. с 324

Захаркин АК, Бубнов ВМ 1995 Способ геоэлектроразведки - А.с. № 2045083 РФ. Оpubл. в БИ, 27.09.95, № 27, 5 с.

Кожевников НО, Снопков СВ 1990 Суперпарамагнетизм в геоэлектрике. — Деп. в ВИНТИ 13.08.90, № 45846 32 с.

Кожевников НО, Снопков СВ 1995 Магнитная вязкость траппов и ее связь с аномалиями электромагнитного поля в методе переходных процессов (Якутская кимберлитовая провинция). Геология и геофизика № 5. с 91—102.

Кожевников НО, Антонов ЕЮ 2008 Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики. Геология и геофизика № 3. с 262–276.

Кожевников НО, Антонов ЕЮ, Матасова ГГ, Камнев ЯК 2012 Метод переходных процессов при изучении геологических сред с магнитной вязкостью. Геофизический журнал №4, Т.34 с 137 – 149.

Кожевников НО, Антонов ЕЮ 2009 Влияние релаксации намагниченности двухслойного полупространства на индукционные переходные характеристики. Геология и геофизика, т. 50 (10) с 1157—1170.

Кожевников НО, Антонов ЕЮ 2018 Влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики установки с закрепленной генераторной петлей. Геология и геофизика т. 59 № 6 с 857 – 865.

Пермяков СА, Денисенко ВП, Попова ГД, Куракина АН и др. 2012 Государственная

геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение).

Buselli G 1982 The effect of near surface superparamagnetic material on electromagnetic transients. *Geophysics* 47, № 9. p 1315—1324.

Dabas M, Skinner JR 1993 Time-domain magnetization of soils (VRM), experimental relationship to quadrature susceptibility *Geophysics* 58, № 3. p 326—333.

Kompaniets S, Kozhevnikov N 2018 Application of

multi-offset arrays in TEM studies on the Siberian platform. 24th EM Induction Workshop, Helsingør, Denmark.

Sharlov, M., Agafonov Yu., Bouddo I. 2018 Possibilities for processing TEM data with quality check: TEM-Processing software. 24th EM Induction Workshop, Helsingør, Denmark.

The geophysics of the Elura orebody 1980 / Ed. D.M. Emerson. Sydney, Austral. Soc. Expl. Geophys., 205 p.

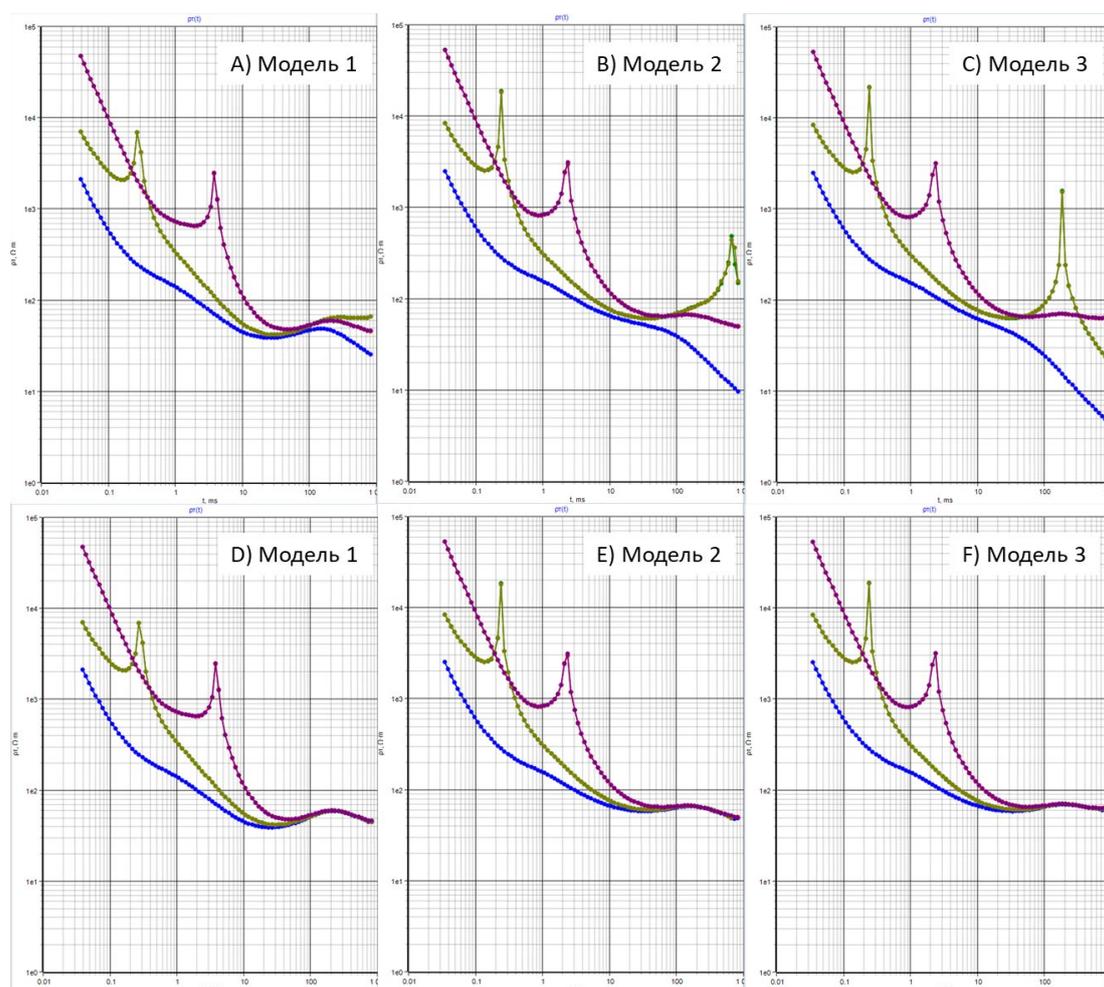


Рисунок 3. Квазиэкспериментальные кривые $\rho\tau(t)$: 3А, 3В, 3С - для исходных геоэлектрических моделей; 3D, 3Е, 3F – результирующие кривые, полученные после моделирования и вычитания ЭДС_{МВ}. На всех графиках синим цветом показана кривая от соосной установки, оранжевым цветом – от разноса 500 м, фиолетовым цветом – референтная кривая от разноса 1500 м.

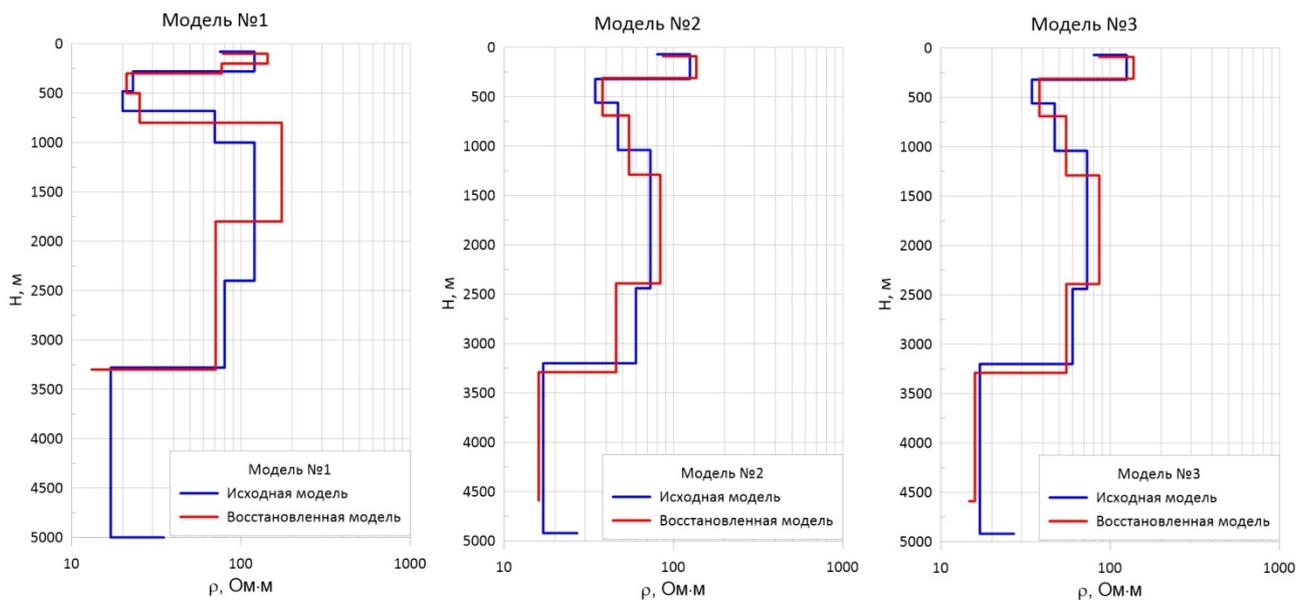


Рисунок 4. Сравнение исходных и восстановленных геоэлектрических моделей.