

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.837

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ С ЗАКРЕПЛЕННОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ ПЕТЛЕЙ

Н.О. Кожевников^{1,2}, Е.Ю. Антонов¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Приведены и обсуждаются результаты моделирования индукционных переходных процессов, наблюдаемых на различном расстоянии от центра генераторной петли при изучении двухслойных сред, в которых магнитная восприимчивость верхнего слоя либо основания зависит от частоты. На графиках профилирования (по оси абсцисс откладывается разнос, по оси ординат — ЭДС, индуцируемая на фиксированном времени в приемной петле) при увеличении разноса наблюдается изменение полярности ЭДС. Для модели с магнитным слоем при любой его мощности полярность ЭДС изменяется сразу же при пересечении приемником провода петли. Для модели с магнитным основанием разнос, на котором ЭДС изменяет полярность, тем больше, чем больше мощность слоя. Для обеих моделей ЭДС на фиксированном времени зависит от мощности слоя и разноса. Особенно сильная зависимость ЭДС от мощности слоя или разноса наблюдается вблизи стороны петли. Поэтому измерения рядом с проводом открывают возможности для определения толщины слоя в том случае, когда она намного меньше длины стороны петли. Суммарный эффект релаксации намагниченности и становления вихревых токов проявляется в том, что при небольших изменениях толщины слоя или разноса переходная характеристика может измениться кардинальным образом.

Метод переходных процессов, магнитная вязкость, двухслойная модель, установка с закрепленным источником.

MAGNETIC VISCOSITY EFFECT ON TEM DATA OF AN ARRAY
WITH A FIXED TRANSMITTER LOOP

N.O. Kozhevnikov and E.Yu. Antonov

In this paper, we present and discuss the results of modeling of the induction processes observed at different distances from the center of a transmitter loop in studies of a two-layer earth in which the magnetic susceptibility of the top layer or the base depends on frequency. Profiling graphs (the offset is plotted on the abscissa, and the EMF induced in the receiver coil at a fixed time is plotted on the ordinate) show that the polarity of the EMF changes as the offset increases. For the model with a magnetic layer of any thickness, the polarity of the EMF reverses immediately after the receiver crosses the loop wire. For the model with a magnetic base, the offset at which the EMF polarity reversal occurs is the larger the greater the thickness of the layer. For both models, the EMF at a fixed time depends on the thickness of the layer and the offset. Particularly strong dependence of the EMF on layer thickness or offset is observed at the loop side. Therefore, measurements near the wire make it possible to determine the thickness of the layer in the case where it is much less than the length of the loop side. The overall effect of magnetic relaxation and transient eddy currents leads to the fact that small changes in the layer thickness or offset can lead to a dramatic change in the transient response.

TEM method, magnetic viscosity, two-layer model, fixed source array

ВВЕДЕНИЕ

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 с и более. В указанный 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.

Известно [Кожевников, Антонов, 2008, 2009], что результирующий сигнал в приемной петле может быть представлен как сумма ЭДС e_1 и e_2 , индуцируемых соответственно релаксацией намагниченности и вихревых токов. ЭДС e_1 спадает обратно пропорционально первой степени времени t :

$$e_1(t) = bt^{-1}, \quad (1)$$

где b — коэффициент, который определяется геометрией установки и не зависит от времени. ЭДС e_2 убывает намного быстрее. В частности, 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, влияние релаксации намагниченности становится преобладающим. Этот момент зависит от пространственного распределения удельной электропроводности и содержания СПМ частиц, а также от геометрии и размеров генераторно-приемной установки.

Учет влияния магнитной вязкости геологических сред на индукционные переходные характеристики представляет актуальную задачу импульсной индуктивной электроразведки, при решении которой важную роль играет математическое моделирование. Ранее проявления магнитной вязкости были изучены преимущественно применительно к симметричным установкам — петля в петле (соосной) и однопетлевой [Кожевников, Антонов, 2008, 2009, 2011]. Что касается разнесенных установок, то моделирование было выполнено в ограниченном объеме для случая, когда источник и приемник расположены на поверхности однородного магнитовязкого полупространства [Кожевников, Антонов, 2008].

В настоящей статье на примере двухслойной среды показано, как эффекты магнитной вязкости проявляются в зависимости от параметров модели и разнеса установки, определяемого как расстояние r между центрами генераторной петли и приемной рамки. Как и в наших предыдущих работах, во избежание повторов в качестве синонимов используются прилагательные «магнитовязкий» и «магнитный», а также «немагнитовязкий» и «немагнитный».

РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С УЧЕТОМ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ

Известны два способа расчета индукционных переходных характеристик с учетом магнитной вязкости [Кожевников, Антонов, 2008, 2009, 2011]. Первый способ основан на связи между вязкой намагниченностью и создаваемым ею магнитным полем, пронизывающим приемную петлю. В этом случае расчет осуществляется во временной области с использованием зависящей от времени магнитной восприимчивости:

$$\kappa(t) = \frac{\Delta\kappa}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} (B + \ln t),$$

где t — время после включения или выключения первичного магнитного поля (временная задержка); $\Delta\kappa$ — разница между статической ($t \rightarrow \infty$) и динамической ($t \rightarrow 0$) восприимчивостями; τ_1, τ_2 — нижняя и верхняя границы диапазона времен релаксации намагниченности; B — константа.

В основу второго способа положено решение краевой задачи уравнения Гельмгольца для источника, расположенного на поверхности горизонтально-слоистой проводящей магнитовязкой среды. Решение отыскивается в частотной области, после чего осуществляется трансформация во временную область. Влияние магнитной вязкости учитывается путем использования комплексной, частотно-зависимой магнитной восприимчивости [Lee, 1984]:

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

где ω — круговая частота; $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица; $\Delta\kappa$ — разница между значениями магнитной восприимчивости на низкой ($\omega \ll 1/\tau_2$) и высокой ($\omega \gg 1/\tau_1$) частотах (декремент магнитной восприимчивости).

Для расчетов, результаты которых представлены и обсуждаются в настоящей статье, использовался второй способ.

ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЕЙ

Подобно тому, как среди множества геоэлектрических моделей фундаментальную роль играет однородное полупространство, среди моделей горизонтально-слоистых сред особое место занимают двухслойные (рис. 1). В статье рассматриваются две двухслойные модели.

Модель 1 представлена магнитовязким слоем, залегающим на немагнитном основании. Она описывает разнообразные геологические объекты. Нередко поверхностный слой содержит большое количество суперпарамагнитных частиц ферромагнитных минералов, релаксация намагниченности которых проявляется как эффект магнитной вязкости. Суперпарамагнитные частицы могут изначально присутствовать в горных породах, например, в траппах, туфах и базальтах [Захаркин и др., 1988; Worm, Jackson, 1999; Kozhevnikov et al., 2016], образоваться в результате экзогенных процессов, например, выветривания [Buselli, 1982; Heller, Evans, 2003], а также побочных продуктов деятельности человека или бактерий [Colani, Aitken, 1966; Linfoord, 2005]. Толщина магнитовязкого слоя варьирует от единиц — десятков сантиметров (почва) до сотен метров, например, в Западной Якутии, где слабомагнитные карбонатные породы перекрыты траппами и туфами.

Модель 2 образована немагнитным слоем, перекрывающим магнитовязкое основание. Она соответствует тем случаям, когда немагнитные породы перекрывают толщи базальтов, траппов, туфов и других магнитовязких пород. Такая модель встречается в археогеофизике при изучении природных и антропогенных объектов сравнительно небольших размеров, например, скоплений древних металлургических шлаков под современными отложениями. При $\rho_1 \rightarrow \infty$ модель может представлять интерес при интерпретации данных аэроэлектроразведки методом переходных процессов, полученных в районах, где наблюдаются проявления магнитной вязкости [Маснае, 2016].

Как и ранее, при расчетах было принято, что $\tau_1 = 10^{-6}$ с, $\tau_2 = 10^6$ с [Кожевников, Антонов, 2008, 2009, 2011]. Значение Δk составляло 10^{-2} ед. СИ, что по порядку величины соответствует оценкам, полученным путем инверсии индукционных переходных характеристик для туфов и траппов Малоботуобинского района в Западной Якутии [Стогний и др., 2010] и базальтов Витимского плато в Забайкалье [Kozhevnikov, Antonov, 2012].

УСТАНОВКА

Расчеты, результаты которых представлены в настоящей статье, выполнены для установки с генераторной петлей размером 25×25 м. Основанием для такого выбора послужил тот факт, что влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики чаще отмечается при работе с установками небольших размеров. В этом случае уже на сравнительно ранних временах сигнал индукционного становления спадает до уровня шумов, тогда как ЭДС, индуцируемая релаксацией намагниченности, превышает этот уровень. С другой стороны, установки с генераторной петлей такого или близких к нему размеров обычно применяются при изучении верхней части геологического разреза (ВЧР) в интервале глубин порядка первых десятков и более метров.

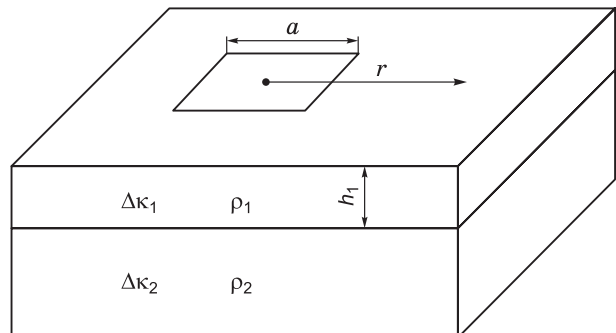
Что касается измерений на поздних (≥ 0.5 с) временах, то лишь недавно качество таких измерений достигло уровня, когда «нюансы» переходных характеристик могут быть уверенно идентифицированы как проявления именно магнитной вязкости [Kozhevnikov et al., 2016]. Вместе с тем в районах, где распространены породы трапповой формации, проявления магнитной вязкости на поздних временах при работе с генераторными петлями большого размера и на разносах свыше 1 км отмечались уже 30 лет назад [Захаркин и др., 1988].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Моделирование эффектов магнитной вязкости проводилось поэтапно. Сначала для обеих моделей удельное электрическое сопротивление слоя (ρ_1) и основания (ρ_2) было принято равным

Рис. 1. Генераторная петля на поверхности двухслойного полупространства:

ρ_1, ρ_2 — удельное электрическое сопротивление, $\Delta k_1, \Delta k_2$ — декремент магнитной восприимчивости соответственно верхнего слоя и основания, h_1 — мощность слоя, r — разнос установки, a — длина стороны генераторной петли.



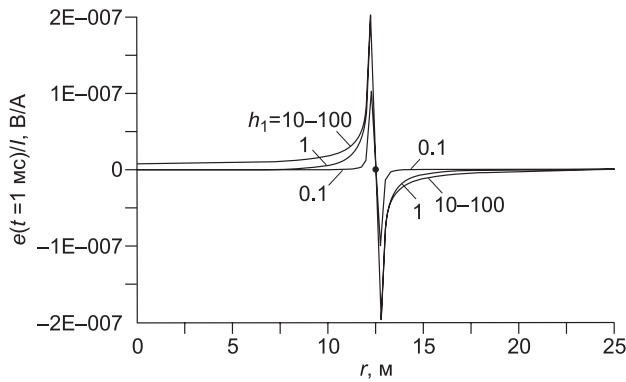


Рис. 2. Графики приведенной к току ЭДС в зависимости от разноса.

h_1 — мощность верхнего слоя (м). Здесь и на рис. 3, 4, 5: точка на расстоянии $r = 12.5$ м показывает место, где профиль пересекает провод петли. Параметры модели: $\rho_1 = \rho_2 = 10^6$ Ом·м, $\Delta\kappa_1 = 0.01$ ед. СИ, $\Delta\kappa_2 = 0$, $h_1 = 0.1—100$ м.

Затем были выполнены расчеты, которые позволили составить представление о том, как магнитная вязкость проявляется на фоне эффектов, создаваемых вихревыми токами. В этом случае удельное электрическое сопротивление слоя и основания составляло 100 Ом·м.

Этап 1, модель 1. Установка располагалась на поверхности магнитовязкого слоя ($\Delta\kappa_1 = 0.01$ ед. СИ), подстилаемого немагнитным основанием ($\Delta\kappa_2 = 0$). Мощность слоя h_1 изменялась от 0.1 до 100 м. При расчетах было принято, что размер приемной рамки составляет 0.1×0.1 м, число витков — 100 (эффективная площадь 1 м^2). Малый размер рамки позволил изучить проявления эффектов магнитной вязкости вблизи (на расстоянии 1 м и менее) провода.

На рис. 2 показаны графики приведенной к току ЭДС, индуцируемой в приемной рамке на времени $t = 1$ мс, вдоль профиля, который начинается в центре петли ($r = 0$), пересекает ее ($r = 12.5$ м) и заканчивается снаружи ($r = 25$ м).

Как можно видеть, когда приемная рамка находится внутри генераторной петли, при увеличении разноса ЭДС сначала почти не изменяется, однако затем, по мере приближения к проводу, все быстрее возрастает. Независимо от мощности слоя при выходе за пределы петли ($r = 12.5$ м) происходит смена полярности ЭДС. Как и при расположении приемника внутри петли, снаружи максимальные абсолютные значения ЭДС также наблюдаются вблизи провода. При удалении приемной рамки от провода ЭДС убывает по абсолютной величине, при этом скорость изменения ЭДС в зависимости от r тем больше, чем меньше расстояние от провода петли до приемной рамки.

Увеличение h_1 приводит к изменению уровня и формы графиков профилирования. Особенно сильное влияние толщины слоя на форму графиков наблюдается вблизи провода. Чем тоньше слой, тем выше чувствительность ЭДС по отношению к изменению его мощности. При $h_1 > 10$ м графики профилирования не реагируют на дальнейшее увеличение h_1 , т. е. эффект слоя становится неотличимым от наблюдаемого на поверхности магнитного полупространства.

Когда приемная рамка находится снаружи петли, при увеличении r ЭДС монотонно убывает, приближаясь к нулю. Однако при перемещении рамки от провода к центру петли ЭДС приближается к некоторому положительному значению, которое тем выше, чем больше мощность слоя. В центральной части петли распределение ЭДС и, соответственно, вторичное магнитное поле не зависят от r .

Графики профилирования в логарифмическом масштабе (рис. 3) позволяют отобразить проявления магнитной вязкости для всего диапазона изменения мощности слоя.

Этап 1, модель 2. Установка располагалась на поверхности немагнитного ($\Delta\kappa_1 = 0$) слоя, подстилаемого магнитовязким основанием ($\Delta\kappa_2 = 0.01$ ед. СИ). Как и в рассмотренном выше случае, расчеты выполнены для h_1 в диапазоне от 0.1 до 100 м. Предшествовавшие основным вычислениям

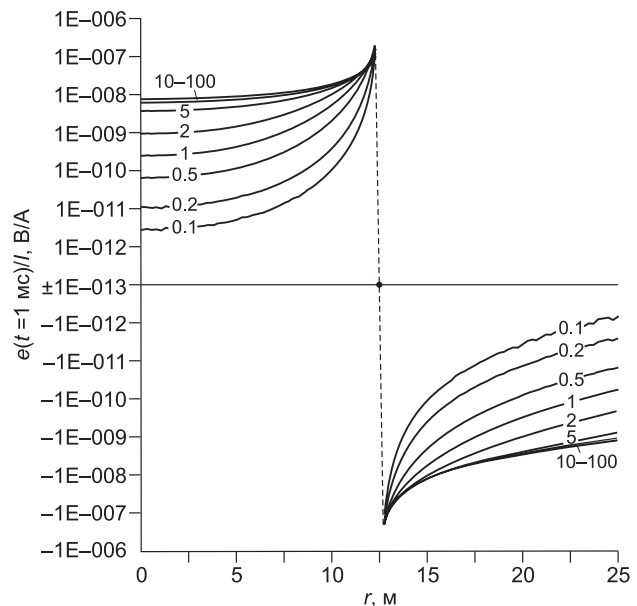


Рис. 3. Графики приведенной к току ЭДС (на времени 1 мс) в зависимости от разноса, построенные в логарифмическом масштабе.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

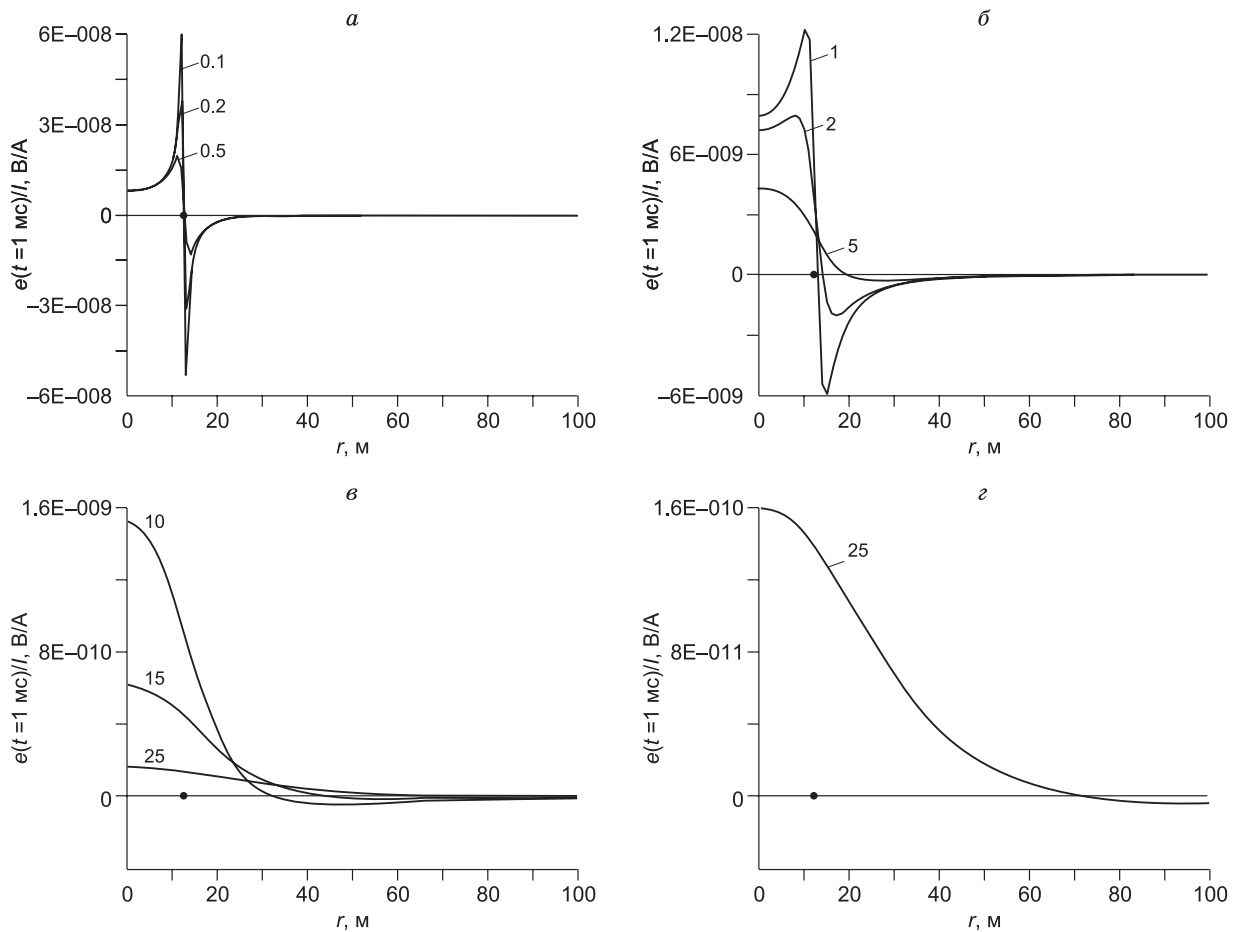


Рис. 4. Графики приведенной к току ЭДС (на времени 1 мс) в зависимости от разноса.

Параметры модели: $\rho_1 = \rho_2 = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\Delta\kappa_1 = 0$, $\Delta\kappa_2 = 0.01 \text{ ед. СИ}$, $h_1 = 0.1\text{—}25 \text{ м}$ (мощность верхнего слоя). *a—г* — описание см. в тексте.

ям оценочные расчеты показали, что при $h_1 \geq 1 \text{ м}$ графики профилирования становятся плавными, а эффекты магнитной вязкости наблюдаются даже на значительном удалении от источника. Поэтому при выполнении основных расчетов длина профиля составляла 100 м, шаг наблюдений равнялся 1 м. Для измерения ЭДС использовалась одновитковая приемная рамка размером $1 \times 1 \text{ м}$. Результаты расчетов показаны на рис. 4.

При неглубоком залегании магнитовязкого основания, т. е. когда $h_1 \ll a$ (см. рис. 4, *a*), по мере приближения к проводу ЭДС все быстрее возрастает. Когда приемная рамка оказывается снаружи петли, ЭДС изменяет полярность. При дальнейшем увеличении разноса ЭДС, оставаясь отрицательной, убывает по абсолютной величине. Скорость убывания ЭДС максимальна вблизи провода и уменьшается по мере удаления от него. При увеличении h_1 (см. рис. 4, *б, в*) графики становятся более плавными, максимум внутри петли перемещается к ее центру, а смена полярности ЭДС происходит при все больших r . На рис. 4, *г* график профилирования для $h_1 = 25 \text{ м}$ показан в крупном масштабе, благодаря чему видно, что в этом случае полярность ЭДС изменяется при $r = 70 \text{ м}$.

Этап 2. Напомним, что вследствие высокого ($10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) удельного электрического сопротивления рассмотренные выше результаты отражают случай, когда вклад магнитного поля вихревых токов в суммарную переходную характеристику пренебрежимо мал по сравнению с эффектом магнитной вязкости. При значениях удельного сопротивления, типичного для большинства горных пород, влияние вихревых токов необходимо учитывать. Ниже это влияние рассматривается на примере модели 2.

Рис. 5, *a* иллюстрирует, как изменяются графики профилирования ($t = 1 \text{ мс}$) при понижении удельного электрического сопротивления слоя и основания с 10^6 до $10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. График профилирования для проводящей среды располагается выше, чем для высокоомной, при этом изменилась и его форма. Хотя ЭДС в зависимости от r по-прежнему изменяется немонотонно, ее полярность в пределах всего профиля

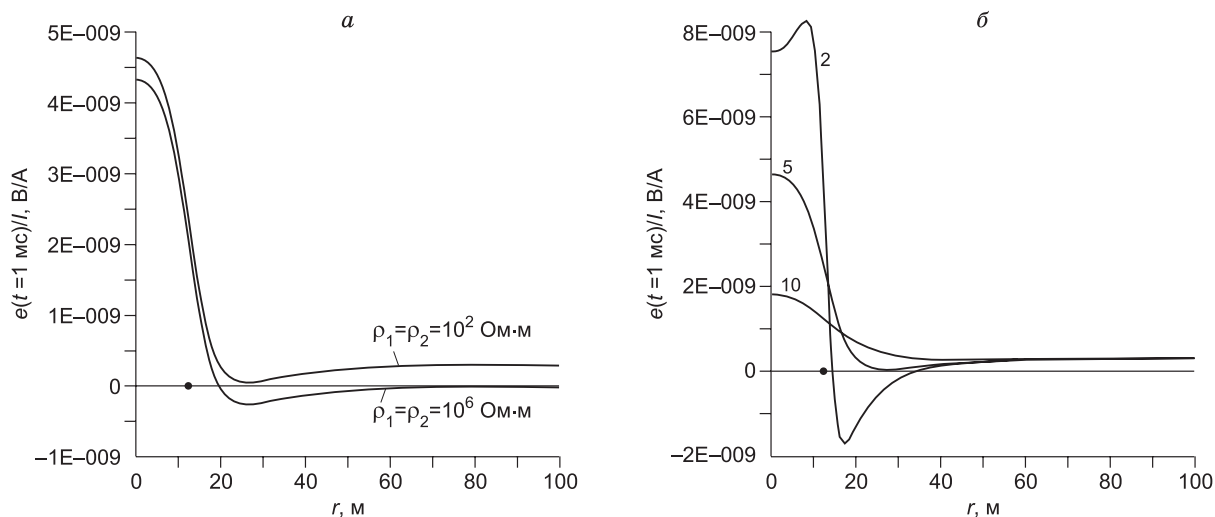


Рис. 5. Влияние на графики профилирования:

a — удельного электрического сопротивления слоя и основания при неизменной ($h_1 = 5$ м) толщине слоя; *б* — толщины слоя (2, 5, 10 м) при неизменном ($\rho_1 = \rho_2 = 10^2$ Ом·м) сопротивлении слоя и основания.

остается положительной. На рис. 5, *б* показаны графики профилирования для трех значений h_1 для проводящей ($\rho_1 = \rho_2 = 10^2$ Ом·м) модели.

Напомним, что когда влиянием вихревых токов можно пренебречь, снаружи петли всегда наблюдается изменение полярности ЭДС (см. рис. 4). Если же вклад вихревых токов в суммарную переходную характеристику значителен (см. рис. 5, *б*), смена полярности наблюдается только при малой толщине слоя. Увеличение h_1 приводит к тому, что ЭДС становится положительной в пределах всего профиля. При $h_1 \geq 5$ м форма графиков сглаживается, а их общий уровень понижается.

Выше при рассмотрении эффектов магнитной вязкости результаты расчетов представлены в виде графиков профилирования на временной задержке 1 мс. В соответствии с выражением (1) графики профилирования на рис. 2—5 легко пересчитать для любого момента времени. Например, для того, чтобы

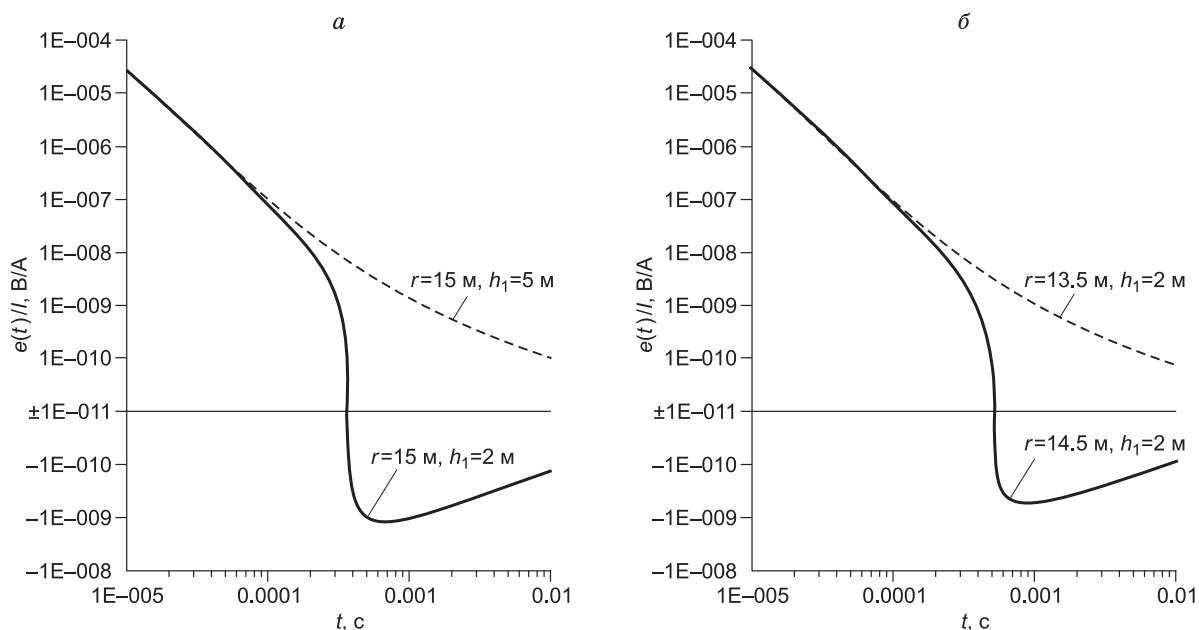


Рис. 6. Небольшие изменения глубины до кровли магнитного основания (*a*) и разноса (*б*) оказывают значительное влияние на переходные характеристики.

Параметры модели: $\rho_1 = \rho_2 = 10^2$ Ом·м, $\Delta k_1 = 0$, $\Delta k_2 = 0.01$ ед. СИ.

построить графики для $t = 0.1$ мс, значения ЭДС на графиках профилирования нужно умножить, а для $t = 10$ мс — поделить на 10.

Графики профилирования в наглядной форме показывают, как проявления магнитной вязкости изменяются в пространстве. Очевидно, не меньший интерес представляет зависимость ЭДС от времени, т. е. переходная характеристика. Проиллюстрируем влияние магнитной вязкости на переходные характеристики на примере модели 2.

Как известно, в поздней стадии становления полярность ЭДС e_2 , индуцируемой в приемнике вихревыми токами, положительна и не зависит от разноса [McNeill, 1980]. В отличие от e_2 , ЭДС e_1 , порождаемая релаксацией намагниченности, на некотором удалении от провода становится отрицательной (см. рис. 4). Поэтому, если приемник расположен снаружи петли на небольшом расстоянии от провода, результирующая ЭДС положительна и монотонно убывает во времени. При удалении приемника от петли e_1 становится отрицательной, а результирующая ЭДС — знакопеременной (рис. 6). При этом небольшие изменения положения петли или толщины слоя приводят к тому, что суммарная переходная характеристика изменяется кардинальным образом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из представленных материалов видно, что для обеих моделей проявления магнитной вязкости зависят от мощности верхнего слоя и разноса. Характерной особенностью графиков профилирования является изменение знака ЭДС снаружи петли. Обозначим разнос, при котором происходит смена полярности (sign reversal), как r_{SR} .

Для модели 1 вне зависимости от толщины магнитного слоя смена полярности происходит сразу же при пресечении приемником провода: $r_{SR} = a/2$. Для модели 2 возрастание толщины слоя сопровождается увеличением r_{SR} (см. рис. 4).

В обоих случаях в центральной части петли ЭДС реагирует на изменения h_1 , однако практически не зависит от разноса. Чем ближе приемник находится к проводу, вне зависимости от того, снаружи или внутри петли, тем быстрее изменяется ЭДС при изменении положения приемника.

ЭДС в центре петли и r_{SR} по-разному реагируют на изменение h_1 . При малой (менее 2—3 м) толщине слоя r_{SR} слабо зависит от h_1 (рис. 7, а). При дальнейшем возрастании толщины слоя r_{SR} увеличивается прямо пропорционально h_1 . В отличие от r_{SR} наибольшая чувствительность ЭДС наблюдается в интервале h_1 от 2 до 10 м (см. рис. 7, б). При $h_1 > 10$ м увеличение толщины слоя все слабее влияет на ЭДС.

Очевидно, оба параметра можно использовать для определения глубины залегания магнитовязкого основания. Как показано ранее, при изучении влияния магнитной вязкости на переходные характеристики симметричных установок [Кожевников, Антонов, 2009] ЭДС в центре петли зависит не только от h_1 , но и от Δk_2 . Поэтому, если для определения h_1 используется ЭДС в центре петли, измерения необходимо проводить с несколькими генераторными петлями разного размера, при этом они должны быть соизмеримы с h_1 [Кожевников, Антонов, 2009, рис. 5, 6]. Из этого следует, что для исследования малых глубин необходимо использовать небольшие ($a \approx h_1$) генераторные петли. Однако, как показывает рис. 4, когда слой тонкий, изменение его толщины оказывает значительное влияние на форму и уровень

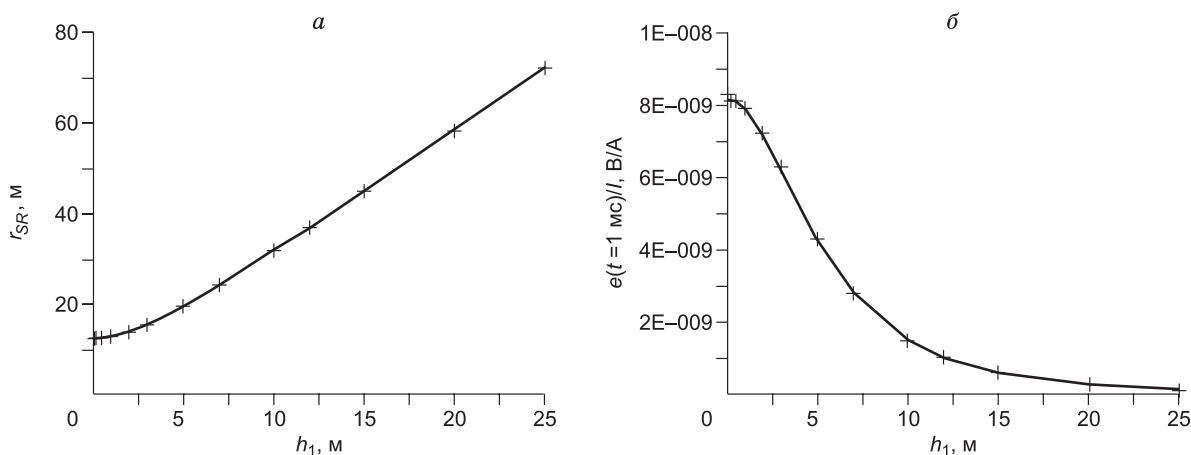


Рис. 7. Влияние глубины до кровли магнитовязкого основания на r_{SR} (а) и ЭДС ($t = 1$ мс) в центре петли (б).

Параметры модели: $\rho_1 = \rho_2 = 10^6$ Ом·м, $\Delta k_1 = 0$, $\Delta k_2 = 0.01$ ед. СИ.

графиков профилирования, особенно вблизи провода петли. Поэтому для определения h_1 и Δk_2 может оказаться эффективным подход, основанный на измерении ЭДС при нескольких положениях приемника вблизи стороны большой ($a \gg h_1$) петли с последующим подбором оптимальных параметров (h_1 и Δk_2) модели. В отличие от ЭДС в центре петли, r_{SR} не зависит от Δk_2 . Если этот параметр (r_{SR}) определен в результате профилирования, с помощью рис. 7, a можно сразу найти h_1 . Сказанное по поводу решения обратной задачи путем подбора модельных графиков ЭДС остается в силе в отношении модели 1 (см. рис. 2, 3). Рассмотренный подход предполагает, что влиянием вихревых токов можно пренебречь. Поэтому для его реализации измерения необходимо выполнять на достаточно поздних временах.

Как показано выше, высокая чувствительность ЭДС по отношению к изменениям r и h_1 является благоприятным фактором для определения толщины слоя. С другой стороны, при малой толщине слоя переходная характеристика реагирует на небольшие изменения r , поэтому незначительные ошибки в определении положения приемника будут приводить к большим погрешностям параметров модели.

На первый взгляд эффекты магнитной вязкости могут показаться незначительными. На удалении от провода при токе в генераторной петле 1 А ЭДС, индуцируемая в приемной рамке площадью 1 м², составляет 10^{-10} — 10^{-12} В (см. рис. 2—5). Однако на практике при выполнении съемок методом переходных процессов ток в генераторной петле составляет 10—100 А, а для измерения ЭДС используются приемные индукционные датчики с эффективной площадью 10^4 — 10^5 м² [Захаркин, 1998]. Поэтому приведенную выше оценку минимальной ЭДС нужно умножить на 10^5 — 10^6 , откуда следует, что диапазон измеряемой в поле ЭДС составляет 10^{-7} — 10^{-4} В. ЭДС такого уровня является типичной при проведении работ методом переходных процессов с использованием современных электроразведочных систем.

ВЫВОДЫ

1. На графиках профилирования (по оси абсцисс откладывается разнос r , по оси ординат — ЭДС, индуцируемая на фиксированном времени в приемной петле) при увеличении разноса отмечается изменение полярности ЭДС. Для модели с магнитным слоем вне зависимости от его мощности смена полярности происходит сразу же при размещении приемника вне контура петли. Для модели с магнитным основанием разнос, на котором ЭДС меняет полярность, тем больше, чем больше мощность слоя.

2. Для обеих моделей ЭДС на фиксированном времени зависит от мощности слоя и разноса. Особенно сильная зависимость ЭДС от мощности слоя или разноса наблюдается вблизи провода петли. Измерения в этой области открывают возможности для определения толщины слоя в том случае, когда она намного меньше длины стороны петли.

3. Суммарный эффект релаксации намагниченности и становления вихревых токов проявляется в том, что при небольших изменениях h_1 и r переходная характеристика изменяется кардинальным образом.

4. Вследствие того, что при малой толщине слоя переходная характеристика реагирует на небольшие изменения r , незначительная погрешность в определении положения приемника может приводить к большим ошибкам при оценке параметров модели.

ЛИТЕРАТУРА

Захаркин А.К. Компактная приемная петля для импульсной электроразведки // Российский геофизический журнал, 1998, № 9—10, с. 95—99.

Захаркин А.К., Бубнов В.М., Крыжановский В.А., Полетаева Н.Г., 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.

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.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние релаксации намагниченности двухслойного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (10), с. 1157—1170.

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние релаксации намагниченности горизонтального пласта на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (4), с. 512—520.

Стогний Вас.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.

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

Colani C., Aitken M.J. Utilization of magnetic viscosity effects in soils for archaeological prospecting // *Nature*, 1966, № 5069, p. 1315—1324.

Heller F. and Evans M.E. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. New York, Academic Press, 2003, 317 p.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y. The TEM method in studies of near-surface magnetically viscous rocks // Near Surface Geoscience 2012 — 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 3—5 September 2012, Paris, France, 2012.

Kozhevnikov N., Agafonov Yu., Antonov E., Buddo I., Kompaniets S. The effect of the Siberian flood basalts magnetic viscosity on a TEM sounding response // 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, 14—20 August 2016, Chiang Mai, Thailand, 2016, S2.3-P272.

Lee T.J. The transient electromagnetic response of a magnetic or superparamagnetic ground // *Geophysics*, 1984, v. 49, № 7, p. 854—860.

Linford N. Archaeological applications of naturally occurring nanomagnets // *J. Phys. Conference Ser.* 17, 2005, p. 127—144

Macnae J. Quantitative estimation of intrinsic induced polarization and superparamagnetic parameters from airborne electromagnetic data // *Geophysics*, 2016, v. 81, № 6, p. E433—E446.

McNeill J.D. Applications of transient electromagnetic techniques: Technical Note № 7: Geonics Limited. 1980, 17 p.

Worm H.-U., Jackson M. The superparamagnetism of Yucca Mountain Tuff // *J. Geophys. Res.*, 1999, v. 104, № B11, p. 25.415—25.425.

*Рекомендована к печати 2 августа 2017 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
14 апреля 2017 г.*