

ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЛАСТА НА ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов

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

Обсуждаются результаты математического моделирования переходных характеристик установок «петля в петле» и совмещенной в присутствии магнитовязкого пласта, расположенного в немагнитной среде. Для совмещенной установки независимо от мощности (h_2) пласта наблюдается экспоненциальное убывание ЭДС (на фиксированной временной задержке) при увеличении глубины (h_1) до его кровли или — если пласт залегает на поверхности — высоты расположения установки. Когда измерения проводят установкой «петля в петле», картина меняется. Если пласт тонкий, то при увеличении h_1 ЭДС возрастает, достигает максимума и затем убывает. Чем тоньше пласт, тем отчетливее выражен максимум. В присутствии пласта большой мощности наблюдается монотонное убывание сигнала с увеличением глубины залегания пласта или высоты расположения установки. Для обеих установок увеличение мощности пласта приводит к росту ЭДС — сначала быстрому, а потом все более медленному. При больших значениях h_2 эффект пласта становится неотличимым от создаваемого магнитовязким полупространством.

Отмеченные особенности переходных характеристик необходимо учитывать при проектировании и проведении съемок методом переходных процессов, а также геологической интерпретации их результатов, если на территории работ распространены природные и/или антропогенные слои с магнитной вязкостью. В общем случае при выключении тока в генераторной петле в земле возникают вихревые токи, которые затухают тем быстрее, чем выше удельное электрическое сопротивление подстилающих петлю пород. Для тех значений удельной электропроводности, которые характерны для геологических сред, процессы установления вихревых токов и вязкой намагниченности протекают независимо один от другого. Поэтому при необходимости учесть влияние вихревых токов можно воспользоваться принципом суперпозиции: результирующая ЭДС переходного процесса в присутствии магнитовязкой и проводящей среды представляет собой сумму сигналов, порождаемых релаксацией намагниченности и затуханием вихревых токов.

Метод переходных процессов, магнитная вязкость, суперпарамагнитные частицы, горизонтальный пласт, геометрические зондирования.

MAGNETIC RELAXATION OF A HORIZONTAL LAYER: EFFECT ON TEM DATA

N.O. Kozhevnikov and E.Yu. Antonov

We have modeled central-loop and coincident-loop transient responses of a magnetically viscous layer sandwiched between two nonmagnetic ones. The coincident-loop transients show exponential voltage decrease (at a fixed delay time), at any thickness h_2 of the magnetic layer, with an increasing depth to the latter (h_1) or the loop height if the layer is exposed on the ground surface. The patterns of central-loop transients are different from those of the coincident-loop ones and from one another for thin and thick magnetic layers. Namely, the voltage first rises to its maximum and then falls as the depth to the magnetic layer (h_1) increases, if it is thin: The thinner the layer, the more prominent the peak. If the layer is thick, the voltage decreases monotonically with its depth (or with loop height above the ground). Voltage grows, first rapidly and then progressively more slowly, at ever greater thicknesses of the magnetic layer in both loop configurations. At large h_2 , the effect from the magnetic layer becomes similar to that from a magnetically viscous half-space. These features of the transient responses have to be taken into account in planning and conducting TEM surveys, as well as in a geological interpretation of the TEM data affected by natural and/or man-caused magnetically viscous ground. In the general case, the turn-off of the transmitter current induces eddy current in the ground beneath the loop, which decays at a rate proportional to the ground resistivity. The eddy current decay and magnetic relaxation processes being independent at conductivities (resistivities) common to the real subsurface, the effect of the former can be allowed for using the superposition principle. This principle implies that the total response of a magnetically viscous conductor is a sum of the magnetic relaxation and eddy current components.

TEM survey, magnetic viscosity, superparamagnetic ground, three-layer earth, geometric sounding

ВВЕДЕНИЕ

Учет влияния магнитной вязкости геологических сред на индукционные переходные характеристики представляет собой актуальную проблему импульсной индуктивной электроразведки. Эта проблема решается средствами лабораторного и полевого [Buselli, 1982; Захаркин и др., 1988; Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Dabas, Skinner, 1993; Barsukov, Fainberg, 2001; Барсуков, Файнберг, 2002; Neumann et al., 2005; Neumann, 2006] экспериментов, а также математического моделирования [Lee, 1984a,b; Кожевников, Антонов, 2008, 2009; Pasion et al., 2002].

В настоящее время нет геологических объектов, изученных в условиях их естественного залегания настолько детально, чтобы на этой основе можно было выполнить систематическое и полное исследование того, как индукционные переходные характеристики изменяются в зависимости от геометрии установки и пространственного распределения магнитной вязкости. Поэтому при изучении проявлений магнитной вязкости особую роль играет математическое моделирование, которое позволяет проводить специально спланированные компьютерные эксперименты. Ранее такое моделирование было выполнено с целью изучения влияния релаксации намагниченности однородного и двухслойного полупространства на индукционные переходные характеристики [Кожевников, Антонов, 2008, 2009].

Очевидно, в качестве следующего объекта исследований логично рассмотреть трехслойную модель. На рис. 1 изображено трехслойное горизонтально-слоистое полупространство, на поверхности которого располагается круглая генераторная петля радиусом R .

Напомним, что проявления магнитной вязкости, которые являются объектом изучения в индуктивной электроразведке, связаны с релаксацией намагниченности присутствующих в горных породах суперпарамагнитных зерен. В этом случае магнитная восприимчивость i -го слоя [Кожевников, Антонов, 2008, 2009] равна

$$\kappa_i(t) = \frac{\kappa_{0i}}{\ln(\tau_{2i} / \tau_{1i})} (B + \ln t),$$

где κ_{0i} — статическая магнитная восприимчивость, τ_{1i} , τ_{2i} — нижняя и верхняя границы диапазона времен релаксации намагниченности i -го слоя, B — константа, t — временная задержка. Как правило, время t , на котором измеряется ЭДС переходного процесса, удовлетворяет неравенствам $\tau_{1i} \ll t \ll \tau_{2i}$, поэтому можно принять, что верхняя и нижняя границы диапазона распределения времен релаксации для всех слоев одинаковы, т.е. для каждого слоя $\tau_{1i} = \tau_1$, $\tau_{2i} = \tau_2$. При выполнении расчетов, результаты которых обсуждаются в настоящей статье, было принято, что $\tau_1 = 10^{-6}$ с, $\tau_2 = 10^6$ с.

В дальнейшем во избежание повторов в качестве синонимов используются прилагательные «магнитовязкий» и «магнитный», а также «немагнитовязкий» и «немагнитный». В общем случае это неверно, так как «немагнитных» пород не бывает. Кроме вязкой в горных породах всегда образуется «нормальная» индуцированная намагниченность, т.е. такая, которая во временном масштабе эксперимента устанавливается практически мгновенно. Эта составляющая намагниченности оказывает влияние на сигналы, измеряемые в низкочастотной индуктивной электроразведке [Низкочастотная..., 1986], однако является «невидимой» для метода переходных процессов.

Предметом исследования настоящей статьи является трехслойная модель, представленная магнитовязким слоем, ниже и выше которого располагаются немагнитные геологические образования, или — иными словами — модель горизонтально-слоистой среды с промежуточным магнитовязким слоем.

Основанием для выбора именно такой модели послужили следующие соображения. Во-первых, другие модели из числа трехслойных с той или иной степенью приближения могут быть сведены к рассмотренным ранее однородному магнитному магнитовязкому полупространству и двухслойным моделям с магнитовязким верхним слоем либо основанием [Кожевников, Антонов, 2008, 2009]. Во-вторых, модель с промежуточным магнитным слоем описывает реальные геологические объекты, например, слои туфов, базальтов, траппов, залегающие на немагнитном основании и перекрытые немагнитными породами. Такая модель может оказаться полезной и в тех случаях, когда объектом исследования являются антропо-

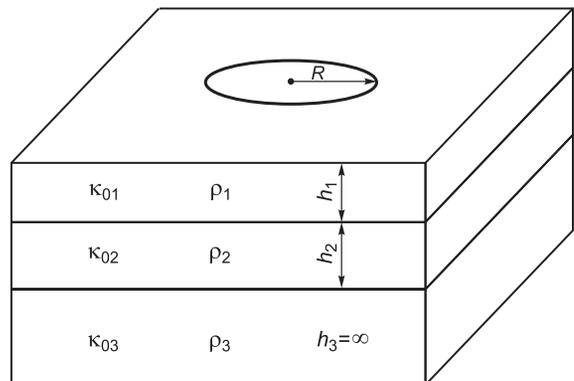


Рис. 1. Незаземленная петля на поверхности трехслойного магнитовязкого полупространства.

Пояснения см. в тексте.

генные образования в виде «культурного» слоя, перекрытого более поздними отложениями, а также древние почвы, в которых в результате деятельности магнитоактивных бактерий образовались суперпарамагнитные частицы. И, наконец, рассматриваемая модель представляет интерес, когда магнитный слой залегает на поверхности, а установка располагается в воздухе, на высоте h_1 по отношению к поверхности земли. Такая система наблюдений применяется в аэрогеофизике, а также может использоваться для детального картирования магнитной вязкости, если установку смонтировать на тележке или другом транспортном средстве. Кроме этого, в тех случаях, когда релаксация намагниченности рассматривается как помеха, установку поднимают для того, чтобы снизить влияние магнитной вязкости [Barsukov, Fainberg, 2001].

Как отмечено выше, объектом исследования в настоящей статье является ЭДС, индуцируемая в приемной петле за счет релаксации намагниченности горизонтального пласта, расположенного в немагнитной среде. Однако в реальных геологических средах каждый слой наряду с мощностью h_i и статической магнитной восприимчивостью κ_{0i} характеризуется удельным электрическим сопротивлением ρ_1 (см. рис. 1). При выключении тока в генераторной петле в земле возникают вихревые токи, которые затухают тем быстрее, чем выше удельное электрическое сопротивление подстилающих пород. Поэтому в общем случае на результаты измерений оказывают влияние оба эффекта. Ранее авторами было показано, что для тех значений удельной электропроводности, которые характерны для геологических сред, процессы установления вихревых токов и вязкой намагниченности протекают независимо один от другого [Кожевников, Антонов, 2008, 2009]. Поэтому при необходимости учесть влияние вихревых токов можно воспользоваться принципом суперпозиции: результирующая ЭДС переходного процесса в присутствии магнитовязкой и проводящей среды представляет собой сумму сигналов, порождаемых релаксацией намагниченности и затуханием вихревых токов.

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С УЧЕТОМ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ

Ранее были рассмотрены два способа расчета переходных характеристик в присутствии однородного и двухслойного магнитного полупространства [Кожевников, Антонов, 2008, 2009]. В первом используется решение уравнения Гельмгольца в частотной области с учетом зависимости магнитной проницаемости от частоты и с последующей трансформацией во временную область. Этот способ является общим, поскольку в решении учитывается взаимодействие между вязкой намагниченностью и вихревыми токами. Второй способ, основанный на связи между вязкой намагниченностью и создаваемым ею магнитным потоком, пронизывающим приемную петлю, позволяет упростить расчеты путем использования известных аналитических решений, однако не учитывает эффекты взаимодействия вихревых токов и релаксации намагниченности и в этом смысле не является «строгим».

Сравнение индукционных переходных характеристик, рассчитанных обоими способами для одних и тех же установок в присутствии однородного и двухслойного полупространств, показало, что переходные характеристики совпадают, если расстояние между проводами генераторной и приемной петель превышает первые сантиметры. При близком — на расстоянии порядка одного сантиметра и менее — расположении проводов генераторной и приемной петель наблюдаются расхождения, анализ которых показал, что в этом случае правильные результаты дает второй способ. Поскольку одна из целей описываемых исследований заключалась в том, чтобы сравнить преимущества и недостатки соосной и совмещенной установок, для моделирования переходных характеристик был использован второй способ расчета.

Необходимо отметить, что в то время как для установки «петля в петле» известны аналитические выражения, с помощью которых можно рассчитать переходные характеристики как для квадратной, так и круглой генераторной и приемной петель, для совмещенной установки аналитическое решение имеется только для круглой петли [Кожевников, Антонов, 2009]. Поэтому в данной статье мы ограничились рассмотрением установок с круглыми генераторными петлями.

Способ, который мы использовали для расчета переходных характеристик, основан на использовании зависящей от времени магнитной восприимчивости $\kappa(t)$ [Кожевников, Антонов, 2008, 2009]. Для однородного магнитовязкого полупространства с магнитной восприимчивостью $\kappa(t)$ ЭДС, индуцируемая в приемной петле после выключения установившегося тока I_0 в генераторной петле за счет релаксации намагниченности, определяется выражением

$$e(t) = \frac{1}{2} I_0 M_0 \frac{d\kappa}{dt}, \quad (1)$$

где M_0 — коэффициент взаимной индуктивности между генераторной и приемной петлями при их расположении на поверхности немагнитной среды. Для установки с совмещенными петлями либо однопетлевой M_0 равна собственной индуктивности L_0 петли.

Для неоднородного полупространства в формулу (1) вместо истинной необходимо подставить кажущуюся магнитную восприимчивость $\kappa_k(t)$, определяемую пространственным распределением истинной магнитной восприимчивости и геометрией установки:

$$e(t) = \frac{1}{2} I_0 M_0 \frac{d\kappa_k}{dt}. \quad (2)$$

На основе результатов, приведенных в работе [Низкочастотная..., 1986], было показано, что для установки с круглой генераторной петлей и находящейся в ее центре приемной рамки, расположенных на поверхности N -слойной магнитовязкой горизонтально-слоистой среды [Кожевников, Антонов, 2009]

$$\kappa_k(t) = \frac{\kappa_{01}}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \left\{ 1 + \left(\frac{R}{h_1} \right)^3 \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\kappa_{0i+1}}{\kappa_{01}} - \frac{\kappa_{0i}}{\kappa_{01}} \right) \left[\left(\frac{R}{h_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{z_i}{h_1} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} (B + \ln t).$$

В этой формуле: κ_{0i} — статическая магнитная восприимчивость i -го слоя, h_i — его мощность, $z_i = h_1 + h_2 + \dots + h_i$ — глубина залегания подошвы.

В работе [Соболев, Шкарлетт, 1967] приведена формула, по которой можно рассчитать переходную характеристику совмещенной установки с круговыми петлями в присутствии двухслойного магнитного полупространства. С учетом эффектов магнитной вязкости зависящая от времени кажущаяся магнитная восприимчивость записывается как [Кожевников, Антонов, 2009]:

$$\kappa_k(t) = \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \frac{\kappa_{02} + (2\kappa_{01} - \kappa_{02})th \frac{3h_1}{2R}}{1 + th \frac{3h_1}{2R}} (B + \ln t), \quad (3)$$

где h_1 — мощность верхнего слоя, κ_{01} и κ_{02} — статические магнитные восприимчивости верхнего слоя и основания соответственно.

При расположении совмещенной установки на высоте d по отношению к поверхности исследуемой среды, магнитную восприимчивость, определяемую формулой (3), необходимо умножить на $\exp(-3d/R)$. Очевидно, эта ситуация идентична той, когда установка располагается на поверхности трехслойной среды с немагнитным верхним слоем. По существу, в этом случае d представляет собой мощность верхнего слоя, поэтому можно принять $d = h_1$, а тот слой, который в формуле (3) был первым или верхним, «превращается» во второй, его мощность логично обозначить как h_2 , а магнитную восприимчивость как κ_{02} . Соответственно, второй слой в формуле (3) становится третьим с магнитной восприимчивостью κ_{03} . С учетом сказанного получаем формулу для кажущейся магнитной восприимчивости трехслойной среды с немагнитным верхним слоем:

$$\kappa_k(t) = \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \frac{\kappa_{03} + (2\kappa_{02} - \kappa_{03})th \frac{3h_2}{2R}}{1 + th \frac{3h_2}{2R}} \exp(-3h_1 / R) (B + \ln t). \quad (4)$$

Теперь, положив $\kappa_{03} = 0$ и подставив кажущуюся восприимчивость, найденную с помощью (4), в формулу (2), можно рассчитать ЭДС, индуцируемую в приемной петле совмещенной установки в присутствии модели с промежуточным магнитовязким слоем.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Поскольку при изучении вертикального распределения магнитной вязкости принцип электромагнитного зондирования не работает, время, на котором измеряется ЭДС переходного процесса, не может использоваться в качестве параметра, контролирующего глубину зондирования. Для изучения вертикального распределения магнитной восприимчивости необходимо использовать геометрические зондирования [Кожевников, Антонов, 2009]. Применительно к рассматриваемым в данной статье симметричным установкам «петля в петле» и совмещенной параметром, контролирующим глубину исследований, т.е. аналогом разнаса, является диаметр (D) генераторной петли.

На рис. 2, 3 представлены результаты расчетов для установок с генераторными петлями диаметром от 10 до 1000 м; в практике электроразведочных работ методами ЗСБ и переходных процессов используются петли с характерными размерами из указанного диапазона. При расчетах было принято, что

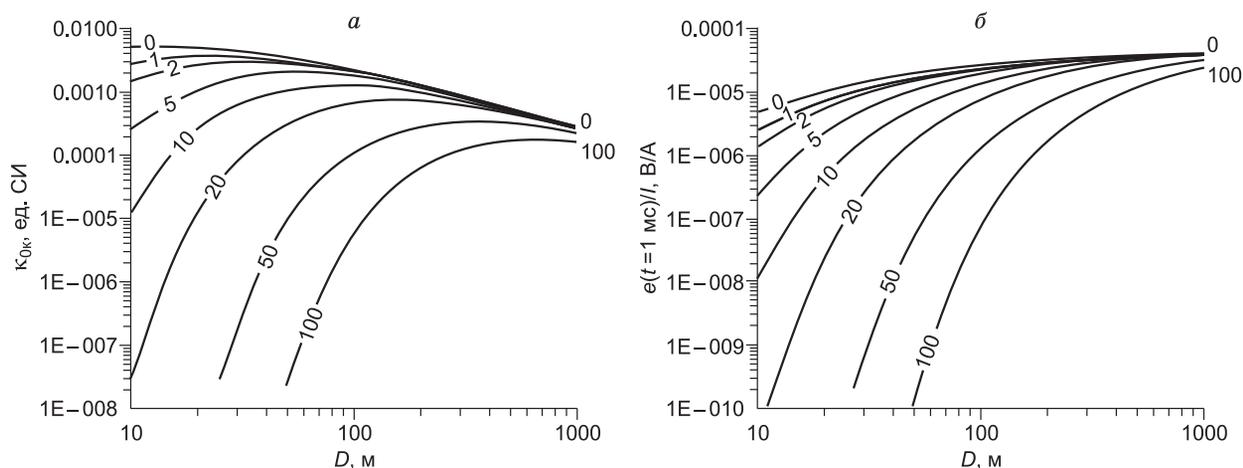


Рис. 2. Кажущаяся статическая магнитная восприимчивость (а) и ЭДС переходного процесса (б) на времени $t = 1$ мс для совмещенной установки с круговыми петлями в присутствии трехслойной среды с магнетовязким промежуточным ($\kappa_{01} = 0$, $\kappa_{02} = 5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\kappa_{03} = 0$) слоем, в зависимости от диаметра D петли.

Мощность h_2 магнетовязкого слоя равна 10 м, шифр графиков — мощность h_1 верхнего слоя (м).

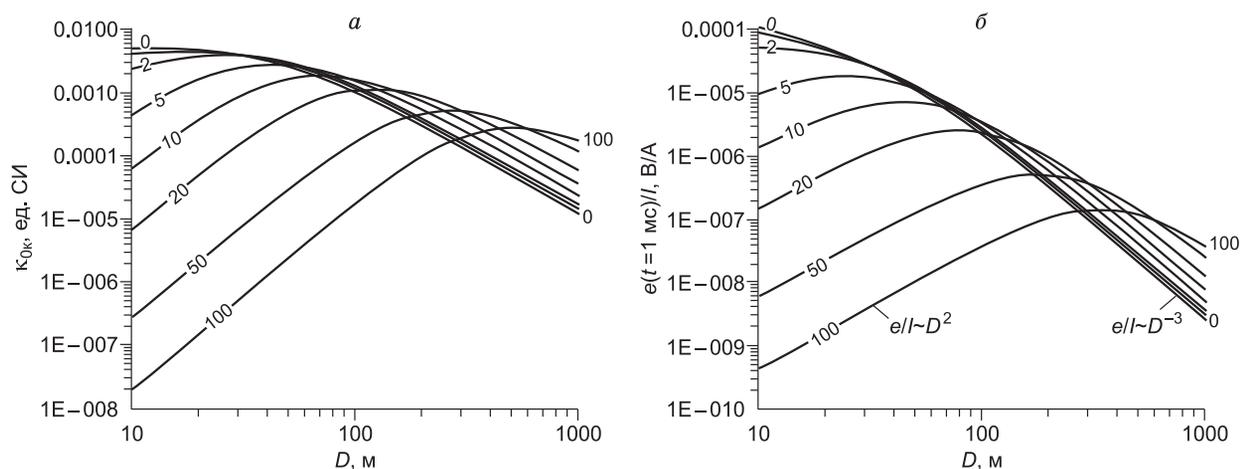


Рис. 3. Кажущаяся статическая магнитная восприимчивость (а) и ЭДС на времени $t = 1$ мс в приемной рамке с эффективной площадью 10^4 м² (б) в присутствии трехслойной модели с магнетовязким промежуточным слоем ($\kappa_{03} = 0$, $\kappa_{02} = 5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, $\kappa_{03} = 0$) в зависимости от диаметра D генераторной петли.

Мощность h_2 магнетовязкого слоя равна 10 м, шифр графиков — мощность h_1 верхнего слоя (м).

в качестве приемника в установке «петля в петле» используется приемная рамка размером 1×1 м и эффективной площадью 10^4 м², мощность h_2 магнетовязкого пласта составляет 10 м, статическая магнитная восприимчивость $\kappa_{02} = 5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Приведенная к току ЭДС переходного процесса (рис. 2, б и 3, б) рассчитана на времени $t = 1$ мс.

Чтобы выяснить, как переходная характеристика зависит от глубины пласта или высоты установки, если пласт залегает сверху, а установка располагается на некоторой высоте по отношению к поверхности земли — расчеты выполнены для набора h_1 в диапазоне от 0 до 100 м. Это позволило рассмотреть наиболее характерные модели, а именно: пласт небольшой ($h_2 \ll h_1$), умеренной ($h_2 \cong h_1$) и большой ($h_2 \gg h_1$) мощности.

Совмещенная установка. На рис. 2, а приведены графики зависимости кажущейся статической магнитной восприимчивости $\kappa_{0к}$ от диаметра генераторно-приемной петли, рассчитанные при разных значениях h_1 . При относительно небольших размерах установки наблюдается возрастание $\kappa_{0к}$ при увеличении D . Этот рост происходит тем быстрее, чем меньше h_1 . Затем на кривой $\kappa_{0к}(D)$ наблюдается плав-

ный максимум, и при дальнейшем возрастании D кажущаяся восприимчивость убывает, при этом различие между кривыми становится все менее заметным. Независимо от диаметра установки увеличение h_1 приводит к уменьшению кажущейся магнитной восприимчивости. Как нетрудно видеть, чем меньше диаметр установки, тем сильнее в относительном выражении различаются значения $\kappa_{0к}$, рассчитанные при разных значениях глубины залегания пласта h_1 .

Рис. 2, б иллюстрирует, как в зависимости от диаметра приемно-генераторной петли и глубины залегания магнитовязкого слоя изменяется ЭДС, индуцируемая в приемной петле. При увеличении диаметра установки ЭДС монотонно возрастает, сначала быстро, а затем все медленнее. Изменение h_1 сопровождается тем большим — в относительном выражении — изменением ЭДС, чем меньше размер установки. При больших размерах установки графики сливаются. Если величина D фиксированна, увеличение глубины залегания слоя приводит к уменьшению ЭДС.

Установка «петля в петле». Графики зависимости кажущейся статической магнитной восприимчивости от диаметра генераторной петли приведены на рис. 3, а. Шифр графиков — глубина залегания слоя h_1 (м). По внешнему виду графики $\kappa_{0к}(D)$ напоминают трехслойные кривые ВЭЗ для модели типа К.

При относительно неглубоком залегании слоя $\kappa_{0к}$ возрастает пропорционально D^3 , затем достигает максимума, после чего уменьшается пропорционально D^{-2} . Если используется генераторная петля небольших размеров, увеличение h_1 приводит к уменьшению кажущейся восприимчивости. Однако при больших D наблюдается обратная картина: погружение слоя приводит к увеличению кажущейся магнитной восприимчивости.

На рис. 3, б приведены графики зависимости ЭДС, индуцируемой в приемной рамке, от диаметра генераторной петли. Шифр графиков — глубина залегания магнитовязкого слоя. Эти графики характеризуются теми же самыми особенностями, что и кривые $\kappa_{0к}(D)$. Если диаметр генераторной петли не превышает 100 м, увеличение глубины залегания слоя приводит к уменьшению ЭДС. Однако при больших D имеет место обратная закономерность: чем глубже магнитовязкий слой, тем больше ЭДС переходного процесса. Этот результат, так же как и отмеченный выше рост $\kappa_{0к}$, является несколько неожиданным, поскольку *a priori* представляется «естественным»: чем глубже расположен слой, тем слабее его влияние на переходную характеристику.

Рассмотрим, как изменяется ЭДС переходного процесса в зависимости от глубины залегания слоя или — если магнитовязкий слой расположен в немагнитной среде, например, в воздухе — как ЭДС зависит от высоты установки по отношению к магнитовязкому слою. Примем, что диаметр генераторной петли равен 10 м. Как и ранее, предположим, что для измерения переходной характеристики установкой «петля в петле» используется расположенная в центре генераторной петли рамка размером 1×1 м с эффективной площадью 10^4 м². Ниже приведены результаты расчетов для набора пластов с мощностью от 0.001 до 10 м, статическая магнитная восприимчивость каждого из которых равна 0.01 ед. СИ. Что

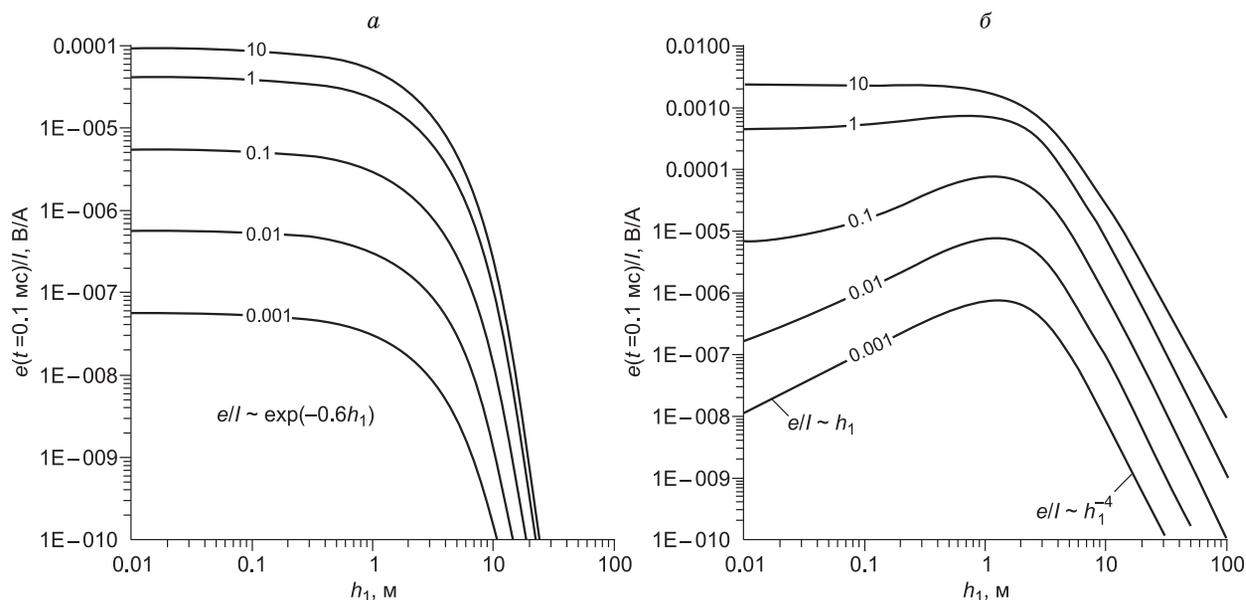


Рис. 4. ЭДС, индуцируемая на времени $t = 0.1$ мс в присутствии магнитовязкого ($\kappa_{02} = 0.01$ ед. СИ) слоя в совмещенной с генераторной (а) и расположенной в ее центре (б) приемных петлях.

Диаметр генераторной петли $D = 10$ м, эффективная площадь расположенной в центре установки приемной петли составляет 10^4 м². Шифр графиков — мощность h_2 слоя (м).

касается глубины залегания пласта h_1 , то она «пробегала» значения в диапазоне от 0.01 до 100 м. Время, на котором рассчитывалась ЭДС, составляло 0.1 мс.

Совмещенная установка. На рис. 4, а показаны графики зависимости ЭДС от глубины залегания пласта, рассчитанные для совмещенной установки в присутствии пласта различной мощности. Как оказалось, независимо от h_2 наблюдается монотонное убывание ЭДС с ростом h_1 . Каждый из графиков на рис. 4, а описывается экспоненциальной зависимостью: $e(t)/I = A \exp(-0.6h_1)$, где начальное значение A тем больше, чем толще слой. Экспоненциальный спад ЭДС становится заметным или «инструментально» ощутимым при $h_1 > 1-1.5$ м.

Установка «петля в петле». На рис. 4, б приведены графики, иллюстрирующие, как ЭДС, измеренная установкой «петля в петле», изменяется в зависимости от глубины залегания слоя. Шифр графиков — мощность пласта в метрах. В отличие от монотонного убывания ЭДС при измерениях совмещенной установкой, здесь наблюдается иная зависимость. При увеличении высоты расположения установки индуцируемая в приемной рамке ЭДС сначала возрастает пропорционально h_1 , затем (при $h_1 \cong 1-3$ м) достигает максимума и, наконец, убывает пропорционально четвертой степени h_1 . Чем тоньше пласт, тем сильнее выражено возрастание ЭДС в области малых значений h_1 (в рассматриваемом примере на интервале от 0.01 до 2—3 м). Так, для пласта мощностью 1 мм ЭДС при возрастании h_1 от 1 см до 1.5 м увеличивается почти два порядка.

По мере того, как пласт становится толще, эффект слабеет. При мощности пласта более 1 м максимум ЭДС не наблюдается, и графики похожи на рассчитанные ранее в присутствии немагнитного слоя, залегающего на магнитовязком основании [Кожевников, Антонов, 2009]: при малых h_1 ЭДС остается постоянной, а затем, когда h_1 превысила некоторое «пороговое» значение, быстро убывает с ростом h_1 .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечалось, *a priori* представляется «естественным» или «нормальным», когда погружение пласта на все большую глубину приводит к ослаблению его влияния и, соответственно, уменьшению ЭДС переходного процесса. Однако, если для возбуждения и измерения переходной характеристики используется установка «петля в петле», по мере удаления установки от пласта сигнал сначала возрастает, достигает максимума и только потом начинает убывать.

Понять, почему так происходит, помогает рис. 5, на котором изображены генераторная петля и два тонких пласта. Один из них расположен непосредственно под петлей ($h_1 = 0$), другой — на глубине $h_1 > 0$. При расположении петли на поверхности пласта первичное магнитное поле почти всюду — за исключением ближайшей окрестности провода петли — направлено перпендикулярно по отношению к пласту. Вследствие сильных эффектов размагничивания намагниченность пласта невелика и, соответственно, невелико создаваемое ею вторичное магнитное поле.

Если же петля расположена на расстоянии h_1 от пласта (см. рис. 5), он намагничивается преимущественно под воздействием горизонтальной составляющей магнитного поля петли. Намагниченность направлена вдоль пласта, и ее величина значительна, в этом случае эффекты размагничивания не возникают. После выключения первичного поля релаксация намагниченности индуцирует в приемной рамке ЭДС, превышающей ту, которая возникает при расположении петли на поверхности пласта.

При дальнейшем увеличении глубины залегания слоя напряженность воздействующего на него первичного магнитного поля все быстрее убывает, в результате чего рост ЭДС замедляется, затем она достигает максимума и, наконец, спадает пропорционально четвертой степени h_1 .

Тот факт, что при погружении тонкого пласта ЭДС переходного процесса может более чем на порядок превысить то значение, которое наблюдается при расположении установки на его поверхности, необходимо учитывать на этапах проектирования и интерпретации результатов съемок методом переходных процессов.

В качестве одного из способов снижения магнитовязких эффектов предложено поднимать установку над поверхностью земли [Barsukov, Fainberg, 2001]. Однако в работе [Кожевников, Антонов, 2009]

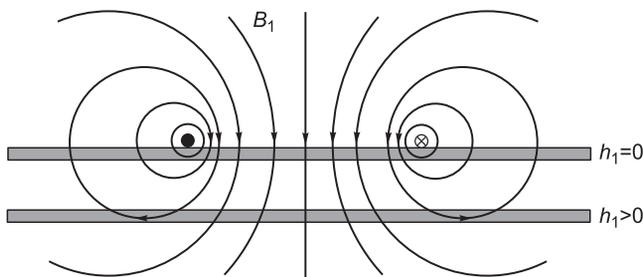


Рис. 5. Генераторная петля и тонкий пласт.

При расположении петли на поверхности ($h_1 = 0$) пласт находится преимущественно в вертикальном магнитном поле, и его намагниченность невелика. Если петля располагается на некотором расстоянии от пласта ($h_1 > 0$), то он сильно намагничивается под действием горизонтальной составляющей магнитного поля петли.

показано, что для ослабления эффектов магнитной вязкости, создаваемых релаксацией намагниченности однородного магнитовязкого полупространства, установку нужно поднимать на высоту, соизмеримую с характерным размером генераторной петли. Если высота расположения установки составляет 15 % от характерного размера петли (в рассматриваемом примере от ее диаметра), ЭДС уменьшается примерно в два раза. Поэтому для эффективного снижения влияния магнитной вязкости установку нужно поднимать на значительную высоту, вследствие чего данный способ вряд ли может найти широкое практическое применение. Что касается залегающего на поверхности тонкого магнитовязкого пласта, для ослабления его влияния установку необходимо поднимать на высоту, превышающую половину характерного размера петли. В противном случае сигнал не уменьшится, а возрастет, т.е. в случае тонкого магнитовязкого пласта рекомендуемый способ снижения магнитовязкого эффекта может не ослабить, а, напротив, усилить геологическую помеху.

Если же релаксация намагниченности в тонком пласте представляет самостоятельный интерес, имеет смысл приподнять установку. Такая ситуация может возникнуть при изучении поверхностного слоя антропогенных геологических образований или залегающих на поверхности туфов, траппов, базальтов. В последнем случае аэросъемка МПП может оказаться более эффективной по сравнению с наземной.

Для тонкого пласта существует такое соотношение между глубиной его залегания и характерным размером установки (см. рис. 4, б), при котором достигается наибольшая ЭДС переходного процесса. Это позволяет путем изменения геометрии установки «подстраивать» ее таким образом, чтобы ее чувствительность по отношению к релаксации намагниченности тонкого пласта была максимальной.

В противоположность этому при использовании совмещенной установки максимум на графике зависимости ЭДС от глубины залегания пласта не наблюдается: по мере увеличения h_1 сигнал экспоненциально убывает. Поскольку в обоих случаях намагничивание пласта осуществляется генераторной петлей одного и того же размера, логично предположить, что отмеченная разница связана с приемной петлей. Если последняя располагается внутри генераторной петли, увеличение h_1 (при относительно небольшой глубине залегания слоя) сопровождается возрастанием взаимной индуктивности M между петлями; если же петли пространственно совмещены, погружение пласта приводит к убыванию M .

Эта разница между установками не очевидна, во всяком случае, ее трудно было бы предвидеть, рассматривая взаимодействие установки и магнитовязкого пласта «на качественном уровне» (см. рис. 5). Детальный анализ отмеченного «тонкого» различия между установками выходит за рамки настоящей статьи, поэтому ограничимся кратким комментарием. Как было показано ранее [Кожевников, Антонов, 2008], ближайшая окрестность провода генераторной петли представляет собой особую область, и было бы логичным средствами математического моделирования изучить, как именно в этой области изменяется зависимость ЭДС от h_1 по мере того, как установка «петля в петле» переходит в совмещенную. Однако в настоящий момент авторы статьи не располагают способом расчета переходной характеристики в присутствии магнитовязкого пласта при близком, т.е. на расстоянии порядка нескольких радиусов провода и менее, расположении генераторной и приемной петель. Тем не менее приведенные результаты дают основания предполагать, что важна не близость совмещенной установки к магнитовязкой среде, как пытался показать в своих работах Ли [Lee, 1984a,b] и как ранее полагали авторы статьи [Кожевников, Антонов, 2008]. Критичным является «близость» между проводами генераторной и приемной петель безотносительно к тому, располагается ли установка на поверхности магнитовязкой среды или на удалении от нее.

ВЫВОДЫ

Учет влияния магнитной вязкости пласта, подстилаемого и перекрытого немагнитными породами, представляет собой актуальную проблему импульсной индуктивной электроразведки. В настоящей статье это влияние изучено средствами математического моделирования с использованием известных аналитических решений на примере установок «петля в петле» и совмещенной.

Для совмещенной установки независимо от мощности h_2 пласта наблюдается экспоненциальное убывание ЭДС при увеличении глубины h_1 до его кровли или — если пласт залегает на поверхности — высоты расположения установки.

Когда измерения проводят установкой «петля в петле», картина меняется. Если пласт тонкий, при увеличении h_1 ЭДС возрастает, достигает максимума и затем убывает. Чем тоньше пласт, тем отчетливее выражен максимум. В присутствии пласта большой мощности наблюдается монотонное убывание сигнала с увеличением глубины залегания пласта или высоты расположения установки.

Такое необычное «поведение» установки «петля в петле» представляет собой проявление эффектов намагничивания. Когда пласт расположен близко к петле, он находится в вертикальном первичном магнитном поле, поэтому — вследствие сильного эффекта размагничивания — намагниченность пласта, и, соответственно, проявления магнитной вязкости, незначительны. При погружении пласта он намагни-

чивается преимущественно горизонтально, при этом размагничивания не происходит, что приводит к увеличению эффектов магнитной вязкости.

Пока остается невыясненным, почему при использовании совмещенной установки увеличение h_1 не сопровождается ростом ЭДС. Можно лишь предположить, что здесь принципиальную роль играет ближайшая окрестность провода петли. Иными словами, важно то, насколько близко расположены генераторная и приемная петли.

Для обеих установок увеличение мощности пласта приводит к росту ЭДС, сначала (т.е. при малых h_2) быстрому, а потом все более медленному. При больших значениях h_2 эффект пласта становится неотличимым от создаваемого магнитовязким полупространством.

Описанные особенности переходных характеристик необходимо учитывать при проектировании и проведении съемок методом переходных процессов, а также геологической интерпретации их результатов, если на территории работ распространены природные и/или антропогенные слои с магнитной вязкостью.

Представленные в статье научные результаты получены при поддержке РФФИ (грант 10-05-00263).

ЛИТЕРАТУРА

Барсуков П.О., Файнберг Э.Б. Исследование окружающей среды методом переходных процессов с использованием ВП и СПМ эффектов // *Физика Земли*, 2002, № 11, с. 82—85.

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.

Кожевников Н.О., Снопков С.В. Суперпарамагнетизм в геоэлектрике. Иркутск, 1990, 32 с. Деп. в ВИНТИ 13.08.90, № 4584-В90.

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.

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.

Низкочастотная индуктивная электроразведка при поисках и разведке магнитных руд / Ю.И. Блох, Е.М. Гаранский, И.А. Доброхотова, И.В. Ренард, Ю.В. Якубовский. М., Недра, 1986, 192 с.

Соболев В.С., Шкарлетт Ю.М. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов). Новосибирск, Наука, 1967, 144 с.

Barsukov P.O., Fainberg B.E. Superparamagnetism effect over gold and nickel deposits // *Eur. J. Environ. Geophys.*, 2001, v. 6, p. 61—72.

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

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

Lee T. The effect of a superparamagnetic layer on the transient electromagnetic response of a ground // *Geoph. Prosp.*, 1984a, v. 32, p. 480—496.

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

Neumann J. Untersuchung von EM-Transienten einer Altlast auf superparamagnetischen Einfluss, Diplomarbeit, Universität zu Köln, 2006, 137 p.

Neumann J., Bergers R., Helwig S.L., Hanstein T., Kozhevnikov N., Tezkan B. Messung der TEM-Antwort von Bodenproben, 21 Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Haus Wohldenberg, Holle, 3—7.10.2005, Hrsg. / O. Ritter und H. Brasse. 2005, s. 331—338.

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.