

## ВЛИЯНИЕ ОБСАЖЕННОЙ СКВАЖИНЫ НА ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, Я.К. Камнев, В.В. Оленченко, А.Е. Плотников,  
С.М. Стефаненко, А.Н. Шеин**

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

Приводится описание и обсуждаются результаты полевого эксперимента по изучению влияния вертикальной обсаженной скважины на индукционные переходные характеристики. Показано, что на ранних временах вихревые токи в скважине по сравнению с токами, протекающими в земле, оказывают на переходную характеристику лишь незначительное влияние. Это позволяет изучать верхнюю часть разреза, используя левую неискаженную ветвь измеренной рядом со скважиной переходной характеристики. На поздних временах влияние скважины преобладает, при этом ЭДС, индуцируемая в приемнике (петле, рамке) вихревыми токами в скважине, описывается экспонентой  $b \cdot \exp(-t/\tau)$ . Постоянная времени  $\tau$  характеризует скорость затухания вихревых токов в скважине. Амплитуда  $b = M_{12} \cdot M_{23} \cdot L^{-1} \cdot \tau^{-1}$ , где  $L$  — собственная индуктивность скважины,  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  — взаимная индуктивность между генераторной петлей и скважиной и скважиной и приемной петлей (рамкой) соответственно. Параметры  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  являются контролируемыми, однако для практических приложений интерес представляет преимущественно взаимная индуктивность между скважиной и приемником, уменьшив которую можно снизить влияние скважины.

*Метод переходных процессов, переходная характеристика, скважина, обсадная колонна, модель, взаимная индуктивность, постоянная времени.*

## EFFECTS OF BOREHOLE CASING ON TEM RESPONSE

**N.O. Kozhevnikov, E.Yu. Antonov, Ya.K. Kamnev, V.V. Olenchenko,  
A.E. Plotnikov, S.M. Stefanenko, and A.N. Shein**

The effect the metal casing of a vertical borehole may exert on transient electromagnetic (TEM) responses has been studied in a field experiment. Eddy currents in the casing affect transients only slightly at early times, but the casing effect predominates at late times. Therefore, early-time TEM response measured near a borehole can provide information on shallow subsurface. The late-time TEM signals induced by the eddy currents in the casing show exponential behavior  $b \cdot \exp(-t/\tau)$ . The time constant  $\tau$  refers to the rate of eddy current decay in the casing; the amplitude  $b$  is  $M_{12} \cdot M_{23} \cdot L^{-1} \cdot \tau^{-1}$ , where  $L$  is the casing self-inductance, and  $M_{12}$  and  $M_{23}$  are the mutual inductances between the transmitter loop and the borehole and between the borehole and the receiver, respectively. Both  $M_{12}$  and  $M_{23}$  are controllable, while  $M_{23}$  is especially important for survey applications: by reducing it, one can reduce the casing effect on the TEM data.

*Transient electromagnetic sounding, transient response, borehole, casing, model, loop, inductance, time constant*

## ВВЕДЕНИЕ

Нередко при производстве электроразведочных работ методами переходных процессов (МПП) или зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) приходится проводить измерения вблизи обсаженных скважин, которые могут оказывать сильное влияние на индукционные переходные характеристики. Очевидно, представления о характере и величине искажений, вызываемых скважиной, а также о способах, с помощью которых эти искажения могут быть учтены и/или минимизированы, необходимы для правильной организации работ и интерпретации материалов импульсной индуктивной электроразведки.

К сожалению, в литературе этому вопросу уделено недостаточно внимания. Нам удалось найти лишь одну статью электроразведчиков из фирмы Zonge Engineering & Research Organization, Inc [Mauldin-Mayerle et al., 1998]. В этой работе в кратком изложении приводятся примеры применения аппаратуры NanoTem для решения проблем малоуглубинной геофизики, в числе которых рассматривается поиск отрезка обсадной трубы диаметром 15 см, закопанной на глубине 0.84 м. Авторы статьи [Mauldin-Mayerle et al., 1998] обсуждают всего один рисунок, где показаны индукционные переходные характеристики

ки, измеренные с помощью горизонтальной приемной рамки над отрезком трубы и на удалении от нее. О размерах генераторной петли не сообщается. На рисунке видно, что на ранних временах переходная характеристика определяется геоэлектрическим строением верхней части разреза (ВЧР), тогда как на поздних — переходным процессом в трубе. Количественные оценки наблюдавшихся эффектов, их интерпретация, а также способы снижения влияния трубы на переходную характеристику не приводятся.

Настоящая статья в какой-то мере восполняет указанный пробел. В ней приводятся и обсуждаются результаты полевого эксперимента по изучению влияния обсаженной скважины на индукционные переходные характеристики. Сначала дается краткая характеристика участка работ, скважины и геоэлектрического разреза. Затем приводится описание методики измерений и результатов эксперимента. После этого рассматривается модель скважины в виде локального проводника, индуктивно связанного с генераторной петлей и приемником. На основе такой модели дается интерпретация полученных результатов и, наконец, обсуждаются возможности и предлагаются практические рекомендации снижения влияния скважины на индукционные переходные характеристики.

На результаты измерений в методе переходных процессов оказывают влияние вихревые токи в металлической обсадной колонне. Поэтому, строго говоря, в данной статье речь идет не о влиянии «скважины», а о влиянии обсадной колонны. При дальнейшем изложении используются оба термина, хотя в обоих случаях речь идет именно о металлической обсадной колонне.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА РАБОТ И СКВАЖИНЫ

Участок работ расположен в Бийско-Барнаульской впадине Западно-Сибирской низменности (Маслянинский район Новосибирской области) на пологоувалистой лесостепной равнине. По данным бурения, геологический разрез до глубины 37 м представлен переслаиванием суглинков и глин. Ниже до глубины 65 м залегают глины коричневые плотные — кора выветривания глинистого сланца. С глубины 65 до 97.2 м вскрыт желтый глинистый сланец трещиноватый, обводненный, подстилаемый углито-глинистым сланцем полутвердым, трещиноватым, с крутым ( $15^\circ$  к оси керна) рассланцеванием. В интервале глубин 65—135 м в трещиноватом глинистом сланце вскрыт водоносный горизонт.

Скважина, в окрестности которой выполнены измерения, пробурена до глубины 132.5 м (рис. 1, а) и обсажена до глубины 111.8 м. Диаметр обсадных труб в интервале глубин от 0 до 4 м составляет 325 мм, от 4 до 74.6 м — 219 мм, от 74.6 до 93 м — 168 мм, от 93 до 110.8 м — 133 мм. На интервале 110.8—132.5 м скважина не обсажена, ее диаметр здесь равен 112 мм.

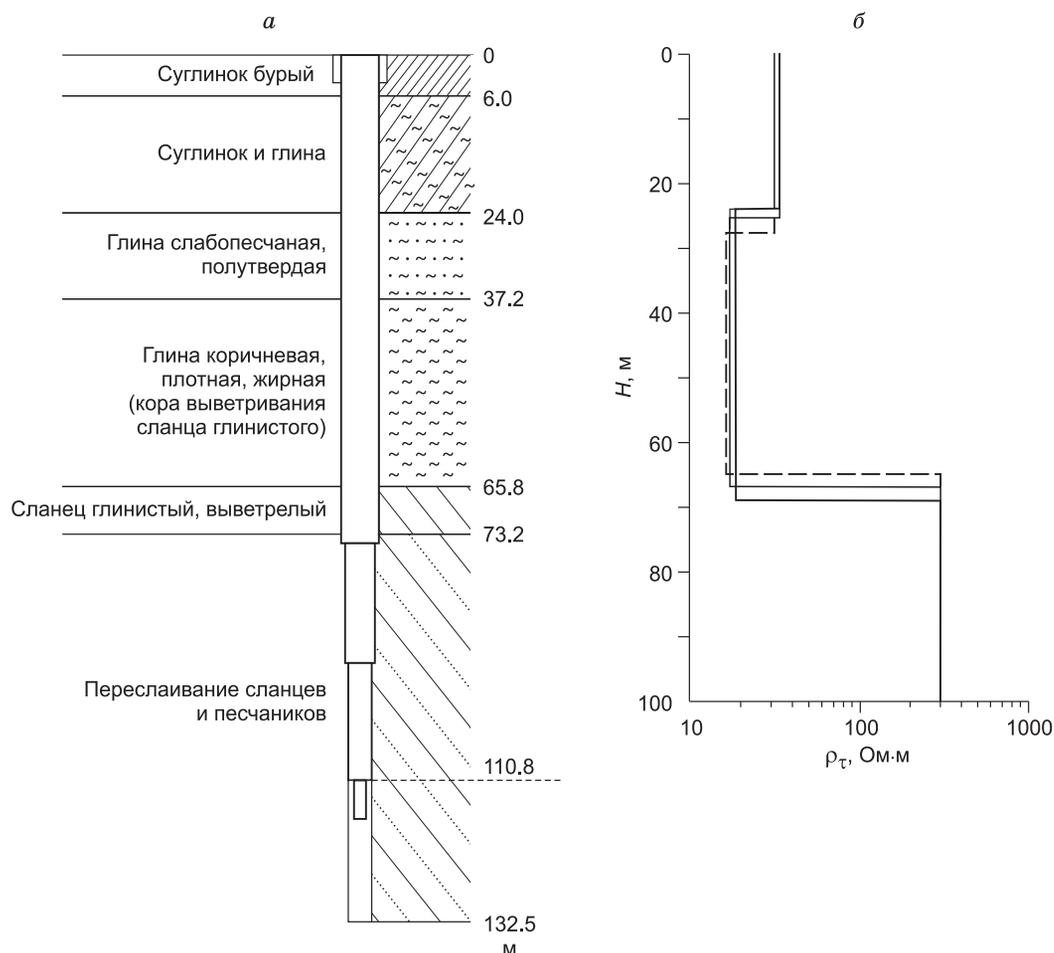
### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент включал два этапа. *На первом этапе* изучалось влияние скважины на переходную характеристику симметричной установки «петля в петле». Были разложены две генераторные петли, каждая размером  $100 \times 100$  м (рис. 2, а). Центр первой генераторной петли (ЗСБ1) совпадал с устьем скважины. Центр второй (ЗСБ2) петли располагался на расстоянии 100 м от устья скважины, при этом ее сторона примыкала к стороне первой петли. Размер генераторных петель ( $100 \times 100$  м) был выбран из тех соображений, что петли такого или близкого к ним размера часто используются при поисках рудных месторождений, решении задач геологического картирования, гидрогеологии, инженерной геологии и т.п. В дальнейшем для краткости пункты ЗСБ1 и ЗСБ2 будем именовать точки 1 и 2 соответственно.

Участок, где проведены измерения, располагался на профиле, на котором были выполнены ЗСБ с целью изучения геоэлектрического разреза в связи с поисками подземных вод. Эти работы показали, что геоэлектрический разрез участка выдержан по латерали. Поэтому есть основания полагать, что переходная характеристика, измеренная в точке 2, при оценке влияния скважины может рассматриваться как референтная.

Для того чтобы выяснить, как влияние скважины зависит от размера приемной петли, измерения переходных характеристик на точках 1 и 2 были выполнены с приемными петлями трех размеров —  $10 \times 10$  м,  $20 \times 20$  м,  $50 \times 50$  м. Во всех случаях центр измерительной петли совпадал с центром генераторной.

На рис. 1, б приведены результаты индивидуальной и совместной инверсии переходных характеристик, измеренных на точке 2 с приемными петлями указанных выше размеров. Инверсия выполнена в рамках модели горизонтально-слоистой проводящей среды с помощью программы TEM-IP [Антонов и др., 2014]. По данным ЗСБ, геоэлектрический разрез на участке работ трехслойный. Верхний слой с удельным сопротивлением 30 Ом·м сложен суглинками и глинами, залегающий ниже слой с сопротивлением 17 Ом·м — глинами. В основании разреза залегают сланцы и песчаники с сопротивлением 300 Ом·м. Как можно видеть при сравнении рис. 1, а и рис. 1, б, геоэлектрические границы совпадают с геологическими, определенными по данным бурения.

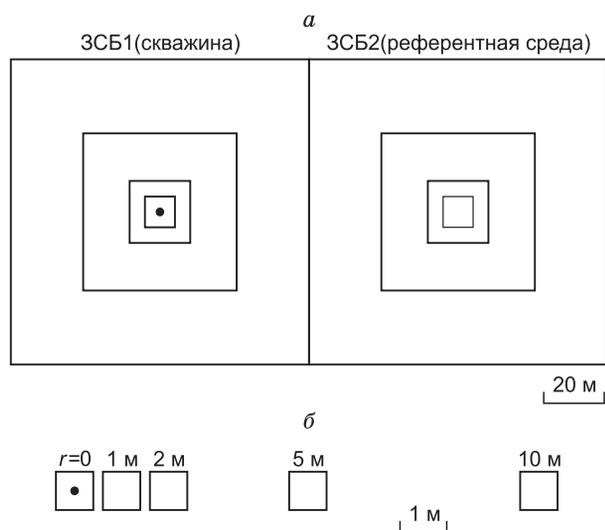


**Рис. 1.** Скважина, геологический разрез (а) и графики  $\rho(H)$ , построенные по результатам индивидуальной (сплошная линия) и совместной (штриховая линия) инверсии переходных характеристик (б).

На втором этапе измерения выполнялись только с первой генераторной петлей. В качестве приемника использовался малогабаритный индукционный датчик (многовитковая рамка с усилителем) с эффективной площадью  $10^4 \text{ м}^2$  конструкции А.К. Захаркина (см. рис. 2, б). Переходные характеристики

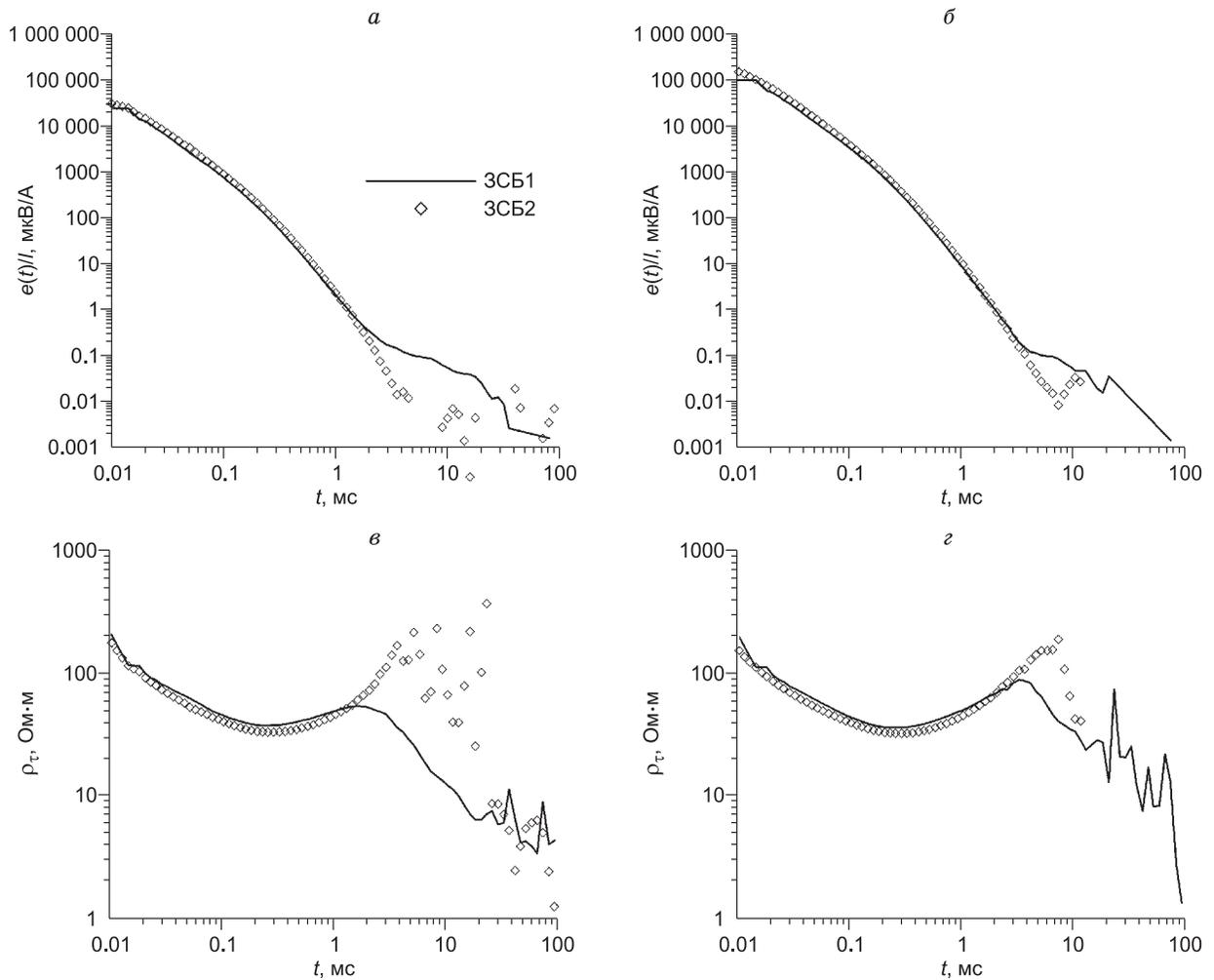
измерены при пяти значениях разнosa  $r$ , т.е. расстояния между центрами генераторной петли (и устьем скважины) и датчика: 0, 1, 2, 5 и 10 м. Это позволило выяснить, как положение датчика влияет на переходную характеристику.

Для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась аппаратура FastSnap [Шарлов и др., 2010].



**Рис. 2.** Схема эксперимента.

$a$  — первый,  $b$  — второй этапы. Залитая точка — устье скважины. Описание см. в тексте.



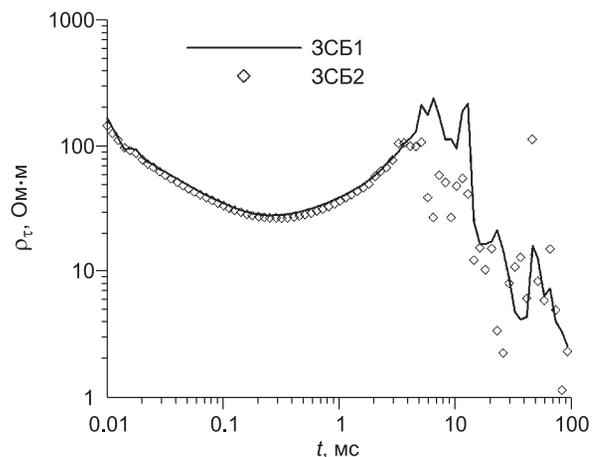
**Рис. 3.** Переходные характеристики (*а, б*) и кривые кажущегося удельного сопротивления (*в, г*), измеренные в точках 1 (скважина) и 2 (референтная среда).

*а, в* — приемная петля  $10 \times 10$  м; *б, г* —  $20 \times 20$  м.

### ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

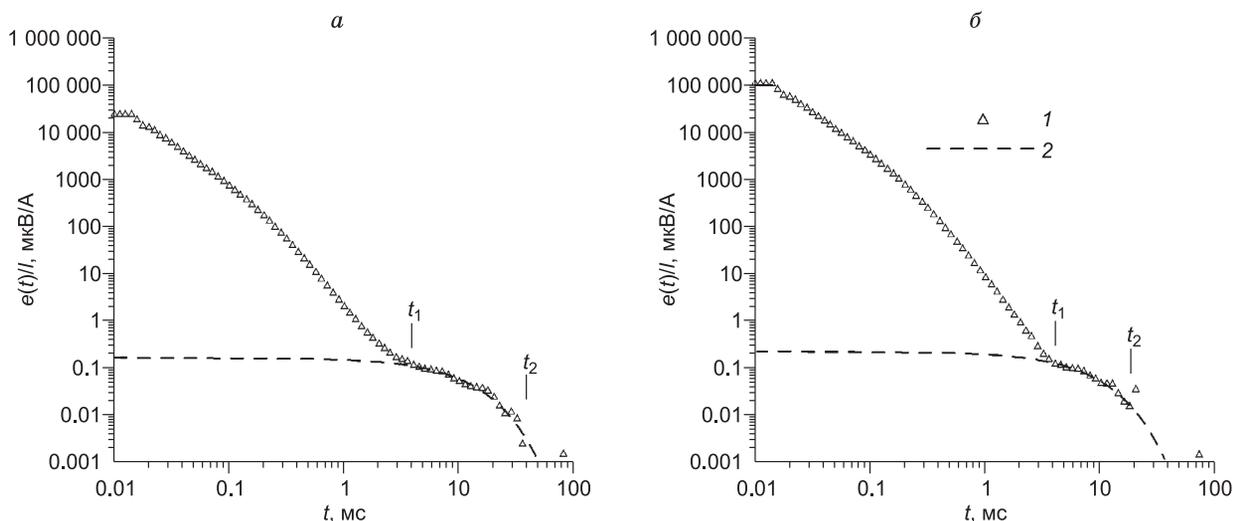
**Этап 1.** На рис. 3, *а* показаны переходные характеристики (графики приведенной к току ЭДС ( $e(t)/I$ ) в зависимости от времени  $t$ ), измеренные в пунктах ЗСБ1 и ЗСБ2 с приемной петлей размером  $10 \times 10$  м. Как можно видеть, на временном интервале от 0.01 до 2 мс переходные характеристики, измеренные на точках 1 и 2, практически идентичны. Влияние скважины проявлено на временном интервале 2—40 мс, в пределах которого ЭДС, измеренная на точке 1, превосходит измеренную на точке 2. Последняя уже на временах более 2 мс падает до уровня шумов ( $\approx 0.01$  мкВ/А).

Соответствующие кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_\tau$  показаны на рис. 3, *в*. Кривая  $\rho_\tau$ , измеренная на точке 2, «рассыпается» на временах, превышающих 2 мс. Это значит, что на поздних



**Рис. 4.** Кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho_\tau$ , измеренные в точках 1 (скважина) и 2 (референтная среда).

Приемная петля  $50 \times 50$  м.



**Рис. 5. Переходные характеристики, измеренные в точке 1 (скважина) с приемной петлей  $10 \times 10$  м (а) и  $20 \times 20$  м (б).**

На поздних временах спад ЭДС происходит по экспоненциальному закону. 1 — измеренная ЭДС, 2 — экспонента.

временах ЭДС падает до значений, сравнимых с уровнем шумов или ниже его. Кривая  $\rho_\tau$ , измеренная на точке 1 (скважина), имеет правую нисходящую ветвь: кажущееся удельное сопротивление закономерно понижается со временем, достигая значений первых ом на метр.

Результаты измерений с приемной петлей  $20 \times 20$  м приведены на рис. 3, б, г. Здесь отмечается такая же картина, как и с петлей  $10 \times 10$  м. На ранних временах графики ЭДС и кривые  $\rho_\tau$  совпадают, тогда как при  $t > 2$  мс наблюдается расхождение из-за влияния скважины.

При измерениях с приемной петлей размером  $50 \times 50$  м картина меняется (рис. 4). На ранних временах влияние скважины по-прежнему незначительно: переходные характеристики, измеренные на точках 1 и 2, совпадают. Однако на поздних ( $t > 3$  мс) временах в отличие от рассмотренных выше случаев, когда использовались приемные петли меньшего размера, обе кривые  $\rho_\tau$  «рассыпаются». Поэтому нет оснований говорить о различии характеристик, измеренных на точках 1 (скважина) и 2 (референтная среда).

На рис. 4 приведена только кривая  $\rho_\tau$ . Это связано с тем, что в области, где сигнал падает до уровня шумов, полярность ЭДС хаотическим образом меняется. Отображение отрицательных значений ЭДС в логарифмическом масштабе связано с определенными трудностями. Для расчета значений  $\rho_\tau$  обычно используют модуль ЭДС, поэтому проблема с отображением данных не возникает.

Особенностью переходных характеристик, измеренных на точке 1 с приемными петлями размером  $10 \times 10$  м и  $20 \times 20$  м, является экспоненциальное затухание ЭДС на поздних временах:

$$e(t)/I = b \exp(-t/\tau), \quad (1)$$

где  $b$  — начальное значение (амплитуда),  $\tau$  — постоянная времени экспоненциального процесса.

На рис. 5 маленькими треугольниками показаны переходные характеристики, измеренные в точке 1 с приемными петлями размером  $10 \times 10$  м и  $20 \times 20$  м. Штриховой линией показаны графики, найденные путем подбора экспоненты, наилучшим образом аппроксимирующей ЭДС на интервале време-

**Результаты аппроксимации «хвостов» переходных характеристик, измеренных на точке 1 (скважина), экспонентой:  $e(t)/I = b \cdot \exp(-t/\tau)$**

Приемник	$(t_1 - t_2)$ , мс	$b$ , мкВ/А	$\tau$ , мс	$R^2$
Петля $10 \times 10$ м	4—40	0.17	9.6	0.97
Петля $20 \times 20$ м	4—40	0.18	8.5	0.84
Петля $20 \times 20$ м	4—18	0.22	6.8	0.98
Датчик, $S_{\text{эф}} = 10^4$ м <sup>2</sup>	5—80	1740	10	0.999

Примечание.  $(t_1 - t_2)$  — временной интервал аппроксимации;  $R^2$  — коэффициент детерминации.

**Рис. 6. Переходные характеристики, измеренные индукционным датчиком.**

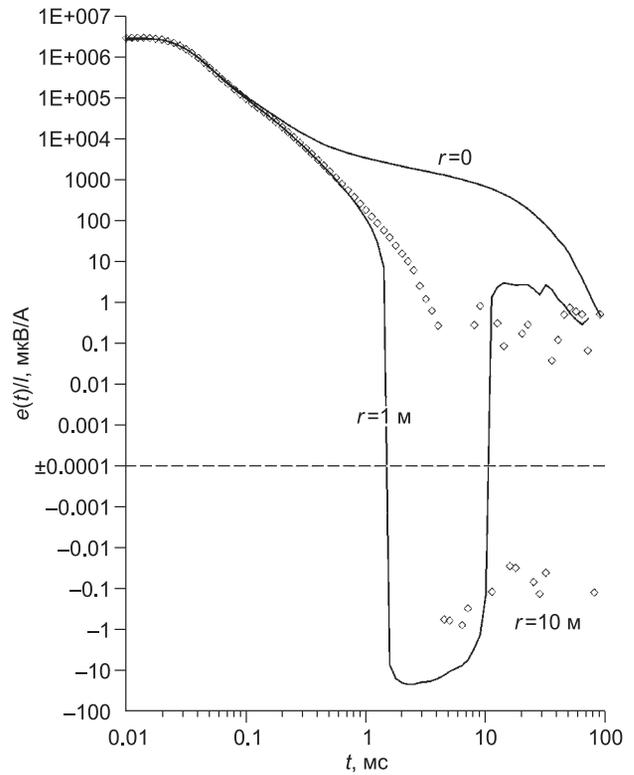
ни ( $t_1—t_2$ ). Параметры экспоненты приведены в таблице. Полученные оценки дают значения  $b \approx 0.2$  мкВ/А; постоянная времени составляет 7—10 мс.

**Этап 2.** Результаты измерений с индукционным датчиком иллюстрирует рис. 6. Как можно видеть, при  $r = 0$  (центр датчика совпадает с устьем скважины) наблюдается медленный, монотонно убывающий переходный процесс положительной полярности. При смещении центра датчика на 1 м по отношению к устью скважины на переходной характеристике отмечается двойная смена полярности: ЭДС меняет знак с положительного на отрицательный при  $t = 1.5$  мс и с отрицательного на положительный при 10.6 мс. При  $r = 10$  м ЭДС, индуцируемая в приемнике, падает до уровня шумов на временах  $t$ , превышающих 4—5 мс.

Графики ЭДС на разносах 2 и 5 м располагаются между графиками ЭДС, измеренной при  $r = 1$  м и  $r = 10$  м. Здесь они не показаны, чтобы не перегружать рисунок. Отметим лишь, что на этих графиках также отмечается смена полярности ЭДС, при этом временной интервал, где отмечается отрицательная ЭДС, сужается по сравнению с тем, который наблюдается при  $r = 1$  м.

На временах  $t \geq 5$  мс переходная характеристика, измеренная в устье скважины, представляет собой экспоненту. График ЭДС, построенный в логарифмическом масштабе, выглядит как прямая линия с отрицательным наклоном (рис. 7). Штриховой линией на рис. 7 показана экспонента ( $b = 1740$  мкВ/А,  $\tau = 10.3$  мс), наилучшим образом аппроксимирующая измеренный сигнал на интервале от 5 до 80 мс.

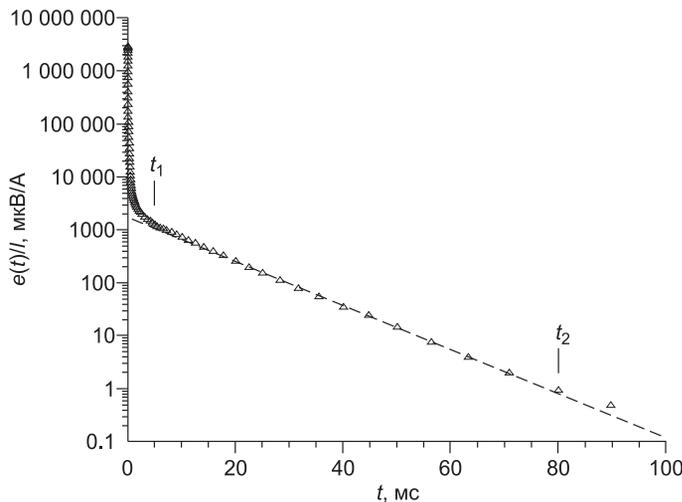
Все оценки параметров  $b$  и  $\tau$ , найденные путем подбора экспонент, наилучшим образом аппроксимирующих «хвосты» переходных характеристик, приведены в таблице.



### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При обсуждении приведенных результатов мы использовали простую наглядную модель, показавшую свою эффективность при обосновании возможности использовать переходный процесс в замкнутой горизонтальной петле при оценке измерительной системы для метода импульсной индуктивной электроразведки [Кожевников, 2012]. Модель основана на представлении генераторной и приемной петель и скважины в виде индуктивно связанных контуров. Первый контур образован генераторной петлей, второй — вихревыми токами, циркулирующими в обсадной колонне, третий — приемной петлей. Вихревые токи, возникающие в земле и обсадной колонне при выключении

в земле и обсадной колонне при выключении



**Рис. 7. Переходная характеристика, измеренная индукционным датчиком в устье ( $r = 0$ ) скважины.**

На временном интервале ( $t_1—t_2$ ) график переходной характеристики, построенный в логарифмическом масштабе, выглядит как прямая линия. Это свидетельствует о том, что на поздних временах вихревые токи в скважине затухают по экспоненте [McNeill, 1980]. Усл. обозн. см. на рис. 5.



**Рис. 8. Индукционный датчик, расположенный в устье скважины (1) и на удалении (2) от нее.**

Штриховой линией показаны вихревые токи в земле и скважине.

первичного поля, индуцируют в приемной петле ЭДС, регистрируемую измерительным блоком аппаратуры.

На рис. 8 показаны геологическая среда, скважина, а также приемник вторичного поля, в качестве которого может быть использована петля или рамка (индукционный датчик). Обозначим приведенную к току ЭДС, индуцируемую в приемнике за счет затухания вихревых токов в земле, т.е. переходную характеристику земли, как  $e_1(t)/I$ , а индуцируемую вихревыми токами в скважине —  $e_2(t)/I$ .

Строго говоря,  $e_1(t)/I$  и  $e_2(t)/I$  не являются независимыми. Однако, как показано в упоминавшейся выше работе [Кожевников, 2012], в достаточно широком временном диапазоне результирующая переходная характеристика  $e_{12}(t)/I$  может быть представлена в виде:

$$e_{12}(t)/I = e_1(t)/I + e_2(t)/I.$$

Простейшей и в то же время фундаментальной моделью геологической среды является однородное проводящее полупространство. Для такой модели ЭДС, наводимая в поздней стадии процесса становления в приемной петле, описывается степенной функцией [Сидоров, 1985; Spies, Frischknecht, 1991]:

$$e_1(t)/I = a \cdot t^{5/2},$$

где  $a$  — не зависящий от времени коэффициент, учитывающий геометрию установки и удельное сопротивление полупространства.

Скважина (обсадная колонна) является проводником ограниченных размеров. В поздней стадии ЭДС, индуцируемая в приемнике переходным процессом, в таком «локальном» проводнике описывается убывающей экспонентой (1) [Кауфман, 1974; McNeill, 1980]:

$$e_2(t)/I = b \exp(-t/\tau).$$

Как известно [Кауфман, 1974; McNeill, 1980], постоянная времени  $\tau$  пропорциональна  $\mu\sigma l^2$ , где  $\mu$  — абсолютная магнитная проницаемость,  $\sigma$  — удельная электропроводность,  $l$  — характерный размер проводящего объекта. Постоянная времени является важным «диагностическим» параметром, в интегральном виде характеризующим «качество» проводника.

Поскольку в контексте настоящей статьи нас интересуют сигналы, измеряемые на временах, намного превышающих длительность выключения тока в генераторном контуре, можно принять, что вы-

ключение тока в генераторной петле происходит мгновенно. В этом случае коэффициент  $b$  определяется выражением [Кожевников, 2012]:

$$b = \frac{M_{12}M_{23}}{\tau L}, \quad (2)$$

где  $M_{12}$  — коэффициент взаимной индуктивности между генераторной петлей и скважиной,  $M_{23}$  — между скважиной и измерительной петлей,  $\tau$  — постоянная времени экспоненциально затухающего переходного процесса в скважине,  $L$  — собственная индуктивность скважины.

На рис. 9 в двойном логарифмическом масштабе показаны идеализированные переходные характеристики. Одна из них представляет собой ЭДС, индуцируемую в приемной петле при затухании вихревых токов в однородном проводящем полупространстве. В двойном логарифмическом масштабе переходная характеристика полупространства выглядит как прямая линия с угловым коэффициентом  $-5/2$ . На этом же рисунке приведены два графика экспоненциально убывающей ЭДС, индуцируемой в приемнике вихревыми токами в скважине. Если устье скважины находится в пределах контура приемной петли (рамки), коэффициент взаимной индуктивности  $M_{23}$  между скважиной и приемной петлей положителен. В этом случае ЭДС, индуцируемые в приемнике вихревыми токами в земле и скважине, имеют один знак, и результирующая переходная характеристика выглядит подобно показанным на рис. 5. Если же устье скважины расположено вне контура приемника (см. рис. 8),  $M_{23} < 0$ . Это значит, что ЭДС, индуцируемая вихревыми токами в скважине, имеет полярность, обратную по сравнению с создаваемой вихревыми токами в земле. Поэтому результирующая переходная характеристика представляет собой разность переходных характеристик земли и скважины.

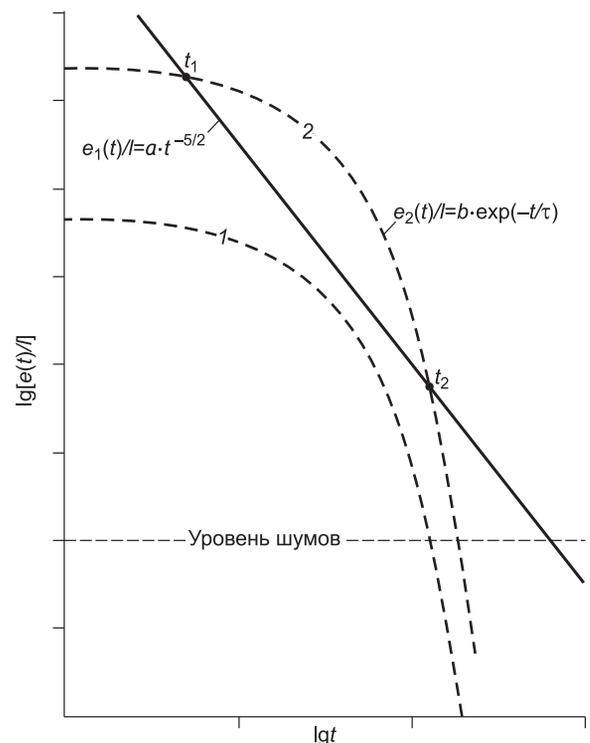
В последнем случае ( $M_{23} < 0$ ) в зависимости от соотношения модулей  $e_1(t)/I$  и  $e_2(t)/I$  возможны различные варианты. Если во всем временном диапазоне  $|e_2(t)/I| \leq |e_1(t)/I|$  (график 1, см. рис. 9), наблюдается немонотонная суммарная переходная характеристика без изменения полярности. Если на некотором временном интервале ( $t_1 — t_2$ ) выполняется неравенство  $|e_2(t)/I| > |e_1(t)/I|$  (график 2, см. рис. 9), наблюдается суммарная переходная характеристика с двойной сменой полярности (см. рис. 6).

Переходная характеристика геологической среды ( $e_1(t)/I$ ) представляет собой полезный сигнал, определяемый параметрами геоэлектрического разреза и генераторно-приемной установки. В отличие от  $e_1(t)/I$ , ЭДС  $e_2(t)/I$  является помехой, которую по возможности необходимо минимизировать. В этой связи возникает вопрос, какие параметры из тех, что входят в выражение (2), мы можем контролировать для снижения влияния скважины. Очевидно, постоянная времени  $\tau$  и индуктивность скважины  $L$  являются собственными характеристиками скважины, которые не могут быть изменены.

Взаимная индуктивность  $M_{12}$  между генераторной петлей и скважиной поддается контролю за счет изменения размеров и положения генераторной петли. Однако последние определяются решаемой геологической задачей (например, требуемой глубиной исследований, детальностью съемок и т.п.), поэтому реальные возможности снижения влияния скважины путем уменьшения  $M_{12}$  ограничены.

Остается  $M_{23}$  — взаимная индуктивность между скважиной и приемником, которую можно уменьшить путем увеличения размеров приемной петли или же при использовании рамки (индукционного датчика) за счет отнесения датчика на возможно большее расстояние от устья скважины. В обоих случаях уменьшается потокосцепление между скважиной и приемником.

На первый взгляд, этому выводу противоречит сравнение переходных характеристик, измеренных на точке 1 с приемными петлями размером  $10 \times 10$  м и  $20 \times 20$  м. Хотя можно было ожидать, что для петли  $20 \times 20$  м потокосцепление и, соответственно, взаимная индуктивность  $M_{23}$  должны быть меньше, чем для



**Рис. 9. Переходные характеристики однородного проводящего полупространства и обсадной колонны.**

1, 2 — описание см. в тексте.

петли  $10 \times 10$  м, амплитуды  $b$  экспоненты для этих петель оказались практически одинаковыми (см. таблицу).

В качестве вероятного объяснения этого противоречия можно привести следующие соображения. В отличие от взаимной индуктивности между петлями, которые на временах, превышающих первые десятки микросекунд, являются контурами с сосредоточенными параметрами [Кожевников, 2006], взаимная индуктивность между приемной петлей и скважиной является эффективным параметром, отражающим распределенный характер индуктивности скважины. Возможно, в случае петли  $20 \times 20$  м увеличение ее размеров компенсируется тем, что она по сравнению с петлей  $10 \times 10$  м более чувствительна по отношению к магнитному полю токов, протекающих в глубоких частях скважины.

Что касается переходных характеристик, измеренных в точках 1 и 2 с приемной петлей  $50 \times 50$  м, то, как уже отмечалось выше, они практически идентичны (см. рис. 4). Это свидетельствует об очень слабом потокосцеплении между скважиной и петлей. Таким образом, при использовании приемной петли размером  $50 \times 50$  м взаимная индуктивность  $M_{23}$  между скважиной и приемной петлей настолько мала, что переходный процесс в обсадной колонне не влияет на суммарную переходную характеристику.

Результаты эксперимента с индукционными датчиками согласуются с представлением о скважине и приемнике как об индуктивно связанных контурах. Так, эксперимент продемонстрировал, что при удалении датчика  $M_{23}$  становится отрицательной. Это происходит потому, что при вынесении датчика магнитное поле вихревых токов, циркулирующих в скважине, направлено противоположно тому, которое пронизывает датчик при его размещении в устье скважины (см. рис. 8). Кроме этого, по мере удаления датчика от устья скважины  $M_{23}$  быстро уменьшается по абсолютной величине.

Завершая обсуждение результатов эксперимента, прокомментируем тот факт, что при использовании в качестве приемника незаземленной петли — даже в том случае, когда ее центр совпадает с устьем скважины — влияние последней начинает проявляться на временах, превышающих 2—3 мс (см. рис. 3). Это означает, что левые ветви переходных характеристик можно интерпретировать в рамках горизонтально-слоистой модели. В рассматриваемом случае это позволяет изучать геоэлектрический разрез до глубины порядка 100 м.

В чем заключается причина отсутствия влияния скважины на ранних временах? Если уподобить скважину локальному проводнику, то в несколько упрощенной трактовке эта причина состоит в следующем. Постоянная времени  $\tau$ , определяющая скорость экспоненциального затухания вихревых токов в обсадной колонне, составляет около 10 мс (см. таблицу). Это значит, что вторичное магнитное поле, создаваемое этими токами, на протяжении временного интервала порядка 1—2 мс изменяется очень медленно по сравнению с создаваемым токами в земле. Соответственно, ЭДС, индуцируемая в приемной петле токами в скважине, намного меньше, индуцируемой токами в земле. Очевидно, чем больше  $\tau$  и ниже сопротивление зондируемой среды, тем на более поздних временах суммарная переходная характеристика начинает заметно отличаться от таковой геологической среды.

Если же переходная характеристика измеряется с помощью индукционного датчика, расположенного в устье скважины, ее влияние становится заметным уже при  $t \approx 100$  мкс (см. рис. 6). Это происходит вследствие сильной индуктивной связи между обсадной колонной и датчиком. Как видно из таблицы, при использовании датчика амплитуда  $b$  экспоненциальной переходной характеристики (1) почти на четыре порядка больше по сравнению с теми значениями, которые получены для петель размером  $10 \times 10$  м и  $20 \times 20$  м. При удалении датчика от устья скважины ее влияние ослабевает. Как можно видеть (см. рис. 6), уже при  $r = 10$  м на временных задержках, превышающих 2—3 мс, сигнал на выходе датчика падает до уровня шумов.

Отметим, что попытки подобрать переходные характеристики, рассчитанные на основе модели горизонтально-слоистой среды, которые во всем временном диапазоне удовлетворительным образом совпадали бы с измеренными данными, не увенчались успехом. Очевидно, на поздних ( $t > 3$ —5 мс) временах вследствие влияния скважины подобрать одномерную модель, объясняющую экспериментальные переходные характеристики, невозможно.

## ВЫВОДЫ

На ранних временах влияние вихревых токов в обсадной колонне на суммарную переходную характеристику незначительно по сравнению с оказываемым вихревыми токами в земле. Это позволяет, используя неискаженную левую ветвь суммарной переходной характеристики, изучать верхнюю часть разреза.

На поздних временах влияние скважины преобладает. ЭДС, индуцируемая на поздних временах в приемнике (петле, рамке) вихревыми токами в скважине, описывается экспонентой  $b \cdot \exp(-t/\tau)$ .

Постоянная времени  $\tau$  характеризует скорость затухания вихревых токов в скважине. Амплитуда  $b$  прямо пропорциональна параметрам  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  и обратно пропорциональна  $L$ ,  $\tau$ .

Первые два параметра ( $M_{12}$ ,  $M_{23}$ ) являются контролируруемыми, однако для практических приложений интерес представляет взаимная индуктивность  $M_{23}$  между скважиной и приемником, уменьшив которую можно снизить влияние скважины.

При использовании в качестве приемника незаземленной петли для уменьшения взаимной индуктивности между скважиной и приемной петлей необходимо увеличивать размер последней; если же для измерения используется приемная рамка (датчик), снижения  $M_{23}$  можно добиться путем удаления приемника от устья скважины.

Представленные в настоящей статье научные результаты получены при поддержке РФФИ (грант 13-05-00122-а).

#### ЛИТЕРАТУРА

**Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А.** Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55(8), с. 1282—1293.

**Кауфман А.А.** Основы теории индуктивной рудной электроразведки. Новосибирск, Наука, 1974, 352 с.

**Кожевников Н.О.** Незаземленная горизонтальная петля как система с распределенными параметрами // Геофизика, 2006, № 1, с. 29—39.

**Кожевников Н.О.** Переходный процесс в петле и его использование при оценке измерительной системы для импульсной индуктивной электроразведки // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (11), с. 1614—1627.

**Сидоров В.А.** Импульсная индуктивная электроразведка. М., Недра, 1985, 192 с.

**Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М.** Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики, 2010, № 01(31), с. 20—24.

**Mauldin-Mayerle C., Carlson N.R., Zonge K.L.** Environmental applications of high resolution TEM methods // The 4th Meeting on Environmental and Engineering Geophysics, Barselona, Spain September 14—17, 1998, European Section, EEGS. 1998, 12 p.

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

**Spies B.R., Frischknecht F.C.** Electromagnetic sounding // Electromagnetic methods in applied geophysics / Ed. M.N. Nabighian. V. 2. SEG, 1991, p. 285—425.

*Рекомендована к печати 11 октября 2013 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
7 мая 2013 г.*