

## **ТЕСТИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАЛОГЛУБИННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ИНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С ПОМОЩЬЮ ЗАМКНУТОЙ ПЕТЛИ**

### ***Николай Олегович Кожевников***

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

### ***Максим Валерьевич Шарлов***

ООО «СИГМА-ГЕО», 664039, Россия, г. Иркутск, ул. Звездинская, 6, генеральный директор, тел. (3952)97-35-17, e-mail: sharlov@sigma-geo.ru

### ***Сергей Михайлович Стефаненко***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-79-08, e-mail: StefanenkoSM@ipgg.sbras.ru

Представлены результаты тестирования измерительной системы для малоглубинных зондирований методом переходных процессов с помощью проводника в виде большой замкнутой петли. Показано, что экспоненциальный отклик от проводника наблюдается на фоне собственного отклика измерительной системы, который содержит быстро и медленно убывающие составляющие. Собственный отклик системы накладывает ограничения на временной диапазон, в пределах которого измеряемый сигнал содержит информацию о параметрах геологической среды.

**Ключевые слова:** малоглубинная импульсная индуктивная электроразведка, замкнутая петля, тестирование.

## **TESTING NEAR-SURFACE TEM SYSTEM USING A LOOP CONDUCTOR**

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

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, phone: (383)333-28-16, e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

### ***Maxim V. Sharlov***

«SIGMA-GEO» LLC, 6, Zvezdinskaya St., Irkutsk, 664039, Russia, General Director, phone: (3952)97-35-17, e-mail: sharlov@sigma-geo.ru

### ***Sergey M. Stefanenko***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Engineer, phone: (383)330-79-08, e-mail: StefanenkoSM@ipgg.sbras.ru

We present the results of testing the near surface TEM measuring system using a large closed loop conductor. It is shown that the exponential conductor response is observed against the intrinsic response of the measuring system. The system intrinsic response contains rapidly and slowly de-

creasing components and limits the time range within which the TEM data contain geologically-related information.

**Key words:** near-surface TEM sounding method, loop conductor, testing.

### *Введение*

Измерительная система для методов импульсной индуктивной электроразведки (МПП, ЗМПП, ЗСБ) включает аппаратуру для возбуждения и регистрации переходных процессов, генераторную и приемную петли, канал синхронизации, кондуктор, источники питания и транспорт. Собственный отклик измерительной системы оказывает влияние на результирующую переходную характеристику, которая, таким образом, отличается от переходной характеристики геологической среды.

В последние 15–20 лет в импульсной индуктивной электроразведке наблюдается тенденция к снижению глубины зондирований за счет проведения измерений на все более ранних временах. Это влечет за собой необходимость уменьшения размеров генераторной и приемной петель, что приводит к резкому снижению отношения полезного сигнала к помехе. Полезный сигнал представляет собой переходную характеристику среды, а помеха – собственный отклик измерительной системы. Проблема особенно усугубляется при попытках изучения слабо проводящих сред. В этом случае для обеспечения малой глубины исследований измерения необходимо проводить на очень ранних временах, когда собственный отклик измерительной системы намного превышает уровень полезного сигнала.

Очевидно, неотъемлемым этапом малоглубинных зондирований методом переходных процессов должно являться тестирование измерительных систем с небольшими петлями.

На ранних временах генераторная и приемная петли, аппаратура и подстилающая их верхняя часть геологического разреза (ВЧР) образуют единую систему с распределенными параметрами, компоненты которой взаимодействуют друг с другом. Поэтому методика тестирования должна быть ориентирована на оценку качества не отдельных блоков аппаратуры, а всей системы в целом. Необходимо проводить тестирование таким образом, чтобы оценить возможности и/или ограничения системы с учетом всех факторов, которые могут повлиять на процесс измерений. Подобная оценка не может быть выполнена в лаборатории, когда источником калибровочного сигнала является электронная схема или переходный процесс в небольшой металлической модели. В этой связи представляет интерес методика тестирования, основанная на возбуждении переходного процесса тока в модели проводника, по размерам сопоставимой с установкой и реальными геологическими объектами. В качестве такой модели удобно использовать замкнутую петлю, расположенную рядом с установкой. В этом случае в системе возникают такие же собственные переходные процессы, как и при проведении штатных полевых измерений. Это гарантирует проявление тех ограничений, которые могут быть не выявлены и, соответственно, оценены в лаборатории.

## Основные положения

При тестировании системы с помощью искусственного проводника, кроме генераторной 1 и приемной 2 петель, на местности раскладывается петля-модель 3 с сопротивлением  $R_0$  и индуктивностью  $L_0$ . К петле подключается цепочка в виде резистора с сопротивлением  $R_1$  и катушки с индуктивностью  $L_1$ . Каждая петля индуктивно связана с другими. Связь между генераторной петлей и моделью характеризуется коэффициентом взаимной индуктивности  $M_{13}$ , между моделью и приемной петлей –  $M_{23}$ . При выключении тока  $I$  в источнике в замкнутой петле возникает ток, который индуцирует в приемной петле ЭДС  $e_2(t)$ . Если среда слабо проводящая, ток в петле-модели затухает по экспоненте с постоянной времени  $\tau=(L+L_1)/(R+R_1)$ . Если к тому же время выключения тока в источнике намного меньше  $\tau$ , что обычно имеет место, то [3]

$$\frac{e_2(t)}{I} = \frac{1}{\tau} \frac{M_{13}M_{23}}{L_0 + L_1} e^{-t/\tau} = Ae^{-t/\tau}. \quad (1)$$

Обозначим ЭДС, измеренную при разомкнутой модели, как  $e_g(t)/I$ , а при замкнутой модели – как  $e_{gm}(t)/I$ . Если геологическая среда слабо проводящая, (как на участке работ), она не влияет на переходный процесс тока в модели. В этом случае

$$e_{gm}(t)/I = e_g(t)/I + e_m(t)/I,$$

где  $e_m(t)/I$  – ЭДС, индуцируемая в приемной петле за счет тока в модели. После того, как измерены переходные процессы при разомкнутой и замкнутой модели, определяется отклик модели:  $e_m(t)/I = e_{gm}(t)/I - e_g(t)/I$ .

Этот отклик сравнивается с рассчитанным по формуле (1). Качество измерительной системы оценивается по отклонению измеренной ЭДС от расчетной.

## Полевой эксперимент

Ниже представлены результаты тестирования установки для малоглубинных исследований. Размер генераторной петли составлял 50м x 50м, приемной – 10м x 10м, измерительная петля располагалась в центре генераторной. Работы выполнены в Приольхонье, на участке, где породы верхней части разреза имеют высокое ( $10^3$  Ом·м и более) удельное электрическое сопротивление. В качестве проводника с контролируемыми параметрами использовалась петля размером 100м x 200м. Измерения переходных характеристик выполнены по профилю, пересекающему проводник, на разном расстоянии  $X$  между центрами петли-модели и установки:  $X=0, 25, 50, 75$  и 175м (рис. 1).

На каждой точке (за исключением той, что расположена в центре проводника) выполнены измерения при следующих параметрах петли-модели: 1) петля разомкнута; 2) петля закорочена ( $R_1=0$ ); 3) параллельно петле подключен ре-

зистор с сопротивлением 10 Ом; 4) к петле подключена катушка с индуктивностью 5,5 мГн. Очевидно, когда петля была разомкнута, регистрировался суммарный отклик среды и измерительной системы. В остальных случаях этот отклик включал дополнительную составляющую за счет быстро ( $R_1=10$  Ом), умеренно ( $R_1=0$ ) или медленно ( $L_1=5,5$  мГн) убывающей ЭДС, индуцируемой в приемной петле током в проводнике. В центре петли ( $X=0$ ) измерения при  $R_1=0$  по техническим причинам выполнить не удалось.

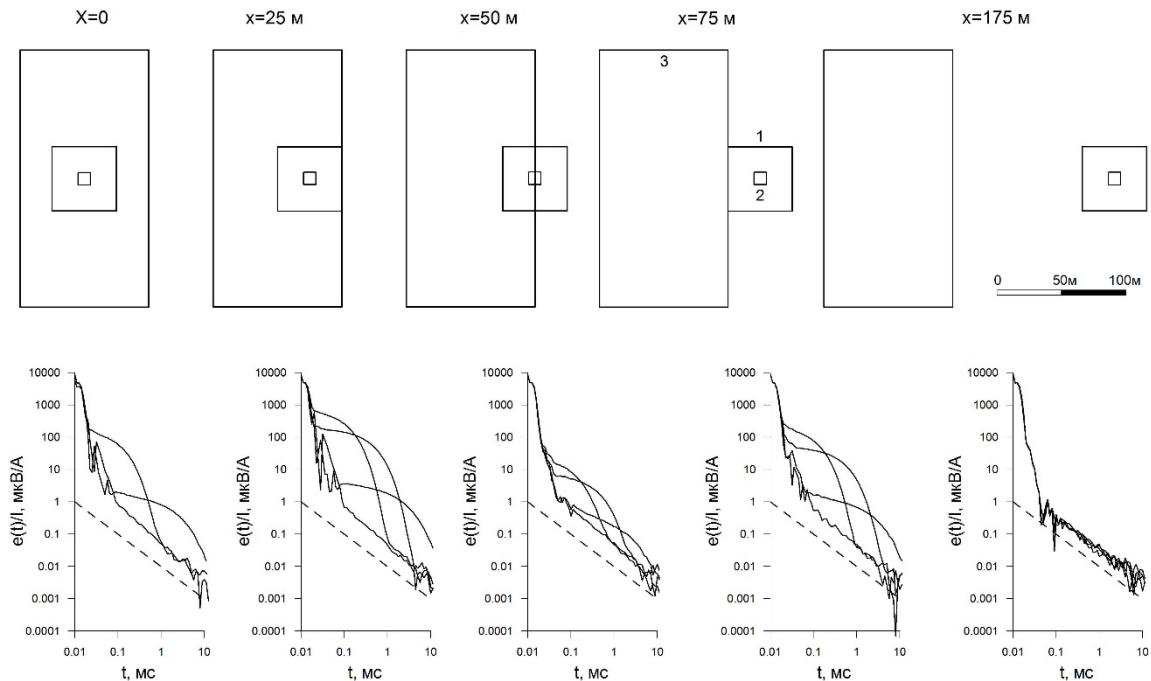


Рис. 1. Положение установки, модели и результаты измерений: 1, 2 – генераторная и приемная петли; 3 – модель. Штриховая линия показывает зависимость  $e(t)/I \propto 1/t$

Для возбуждения и измерения переходных процессов использовалась цифровая аппаратура FastSnap [7]. Эта аппаратура позволяет выполнять измерения с частотой дискретизации входного сигнала до 40 МГц. Переходные характеристики записываются в базу данных в первоначальной форме с арифметическим шагом дискретизации, что предоставляет широкие возможности для их дальнейшей обработки и интерпретации. Во всем временном диапазоне относительная среднеквадратичная погрешность измерений не превышала 5%.

Результаты измерений представлены в нижней половине рис. 1. Видно, что, когда петля-модель разомкнута, переходная характеристика не зависит от положения установки на профиле. На ранних – в диапазоне от 0,01 до 0,1 мс – времена ЭДС убывает приблизительно пропорционально четвертой степени времени. Начиная с  $t \approx 0,1$  мс, наблюдается аномально медленный, как  $1/t$ , спад ЭДС, который невозможно объяснить геологией. Геоэлектрическая модель, найденная в результате инверсии переходных характеристик, содержит слой

с очень низким, порядка единиц Ом·м, удельным сопротивлением и глубиной залегания кровли около 350 м. С учетом данных о геологии этой части Приольхонья и результатов предшествующих геофизических работ присутствие такого слоя представляется крайне маловероятным. Таким образом, логично предположить, что при разомкнутой петле-модели переходная характеристика представляет собой собственный отклик измерительной системы.

Когда петля-модель замкнута, результирующая переходная характеристика содержит экспоненциальный спад ЭДС, подобный тем, которые наблюдаются в присутствии проводящих рудных тел ограниченного размера. Скорость убывания ЭДС определяется параметрами петли и подключенных к ней элементов и не зависит от положения установки. Как известно, постоянная времени  $\tau$  представляет собой интегральный показатель «качества» проводника, такого, как рудное тело, невзорвавшийся боеприпас и т.п.

Амплитуда  $A$  экспоненциального сигнала в соответствии с выражением (1) определяется положением установки (от него зависят  $M_{13}$  и  $M_{23}$ ), постоянной времени  $\tau$  и индуктивностью  $L_0+L_1$ . При  $X=175$ м установка не «чувствует» проводник: различие между переходными характеристиками при замкнутой и разомкнутой петле не превосходит погрешность наблюдений.

На рис. 2, а приведены переходные характеристики, измеренные в точке с координатой  $X=0$  при разомкнутой ( $R_1=\infty$ ) и замкнутой ( $R_1=10$  Ом) петле. Справа (рис. 2, б) показан разностный сигнал  $e_m(t)$  и аппроксимирующая его экспонента, по которой были определены постоянная времени  $\tau$  и амплитуда  $A$  переходного процесса, индуцируемого в приемной петле током в проводнике. В данном случае  $\tau=0.112$  мс,  $A=156$  мкВ/А.

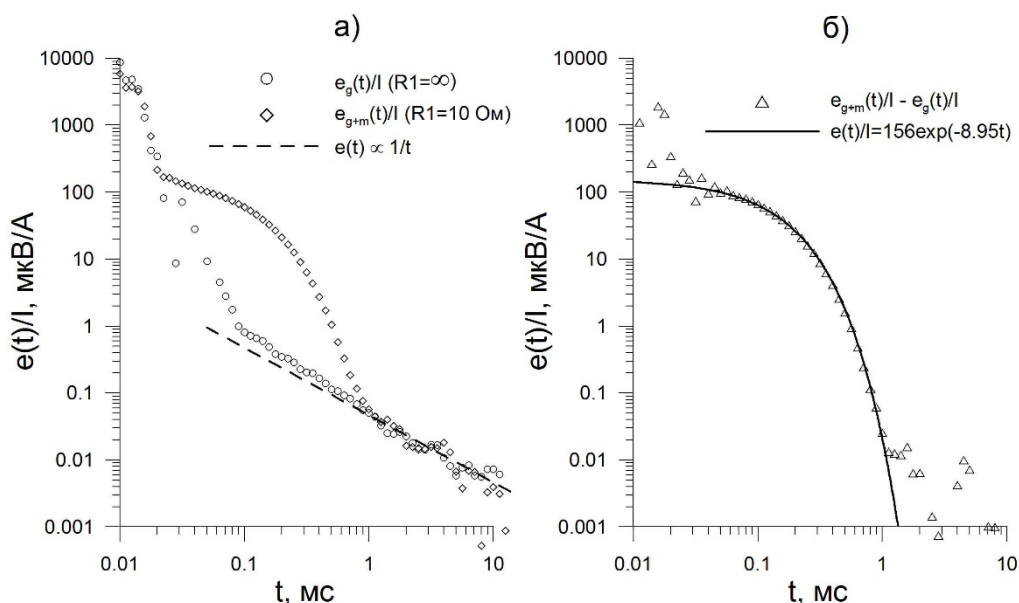


Рис. 2. Результаты тестирования для установки, расположенной в центре ( $X=0$ ) петли-модели (см. рис. 1, а):

а) переходные характеристики, измеренные при разомкнутой ( $R_1=\infty$ ) и замкнутой ( $R_1=10$  Ом) петле; б) график  $e_{gm}(t)/I$  и аппроксимирующая его экспонента

Результаты подбора экспоненты для всех наблюдений суммирует таблица. Приведенные в ней данные характеризуют возможности измерительной системы при оценке параметров простой модели.

Параметры модели и экспоненты, аппроксимирующей  $e_m(t)/I$

$X, м$	$R_1, Ом$	$L_1, мГн$	$A, мкВ/А$	$\tau, мс$
0	10	0	156	0.112
	0	5.5	1.24	2.08
25	0	0	182	0.376
	10	0	636	0.099
	0	5.5	2.55	2.43
50	0	0	6.13	0.339
	10	0	22.3	0.094
	0	5.5	0.214	1.92
75	0	0	48	0.433
	10	0	210	0.096
	0	5.5	0.936	2.42

В зависимости от положения установки разница между значениями постоянной времени составляет 8 – 12 %. Средние значения  $\tau$  равны 0,100 мс ( $R_1=0$ ,  $L_1=0$ ), 0,383мс ( $R_1=10$  Ом,  $L_1=0$ ), 2,21мс ( $R_1=0$ ,  $L_1=5,5$  мГн). Стандартная ошибка (относительное среднеквадратичное отклонение среднего) для перечисленных средних значений оценивается, соответственно, в 4, 7 и 6 процентов.

### **Обсуждение результатов и выводы**

Как показал полевой эксперимент, собственный отклик измерительной системы не зависит от положения установки. Он включает быстро и медленно убывающие составляющие. Первая составляющая имеет большую амплитуду, однако, в течение 100 мкс убывает на четыре порядка. Поэтому, начиная с временной задержки порядка 0,1 мс, остается только составляющая, убывающая обратно пропорционально времени в первой степени.

При замкнутой петле-модели на фоне собственного отклика системы наблюдается полезный сигнал в виде экспоненциально убывающей ЭДС. Постоянная времени  $\tau$  экспоненциального спада определяется параметрами модели, тогда как амплитуда  $A$  – параметрами модели и положением установки.

Удельное электрическое сопротивление геологической среды на участке работ превышает  $10^3$  Ом·м. Поэтому она не оказывала влияния на переходный процесс тока в проводнике, который в данном случае описывается выражением (1). Результирующая переходная характеристика равна сумме откликов измерительной системы и модели.

Замкнутая петля представляет простую и удобную модель, переходный процесс в которой подобен наблюдаемому в проводниках ограниченных размеров, например, рудных телах с повышенной электропроводностью. «Качество» проводника характеризует постоянная времени  $\tau$ , определение которой является классической задачей, решаемой методом переходных процессов. В рамках рассмотренного эксперимента относительная погрешность определения постоянной времени по переходным характеристикам составила около 10%.

Измеренные собственная индуктивность  $L_0$  и сопротивление  $R_0$  петли равны, соответственно, 1,43 мГн и 3,5 Ом. Это дает возможность непосредственно определить постоянную времени модели, которая для замкнутой ( $R_1=0$ ,  $L_1=0$ ) петли равна 0,41 мс. В случае подключения к петле резистора с сопротивлением 10 Ом постоянная времени равна 0,106 мс, а катушки индуктивности – 1,98 мс. Эти значения  $\tau$  могут рассматриваться как известные (или истинные). Очевидно, разница между ними и приведенными в таблице 1 дает объективную оценку качества решения геофизической задачи.

Располагая оценкой  $\tau$  можно, воспользовавшись (1), определить амплитуду экспоненциального сигнала. Согласно расчетам по формуле (3.12) из справочника [8] для установки, расположенной в центре петли-модели  $M_{13}=2,45 \cdot 10^{-5}$  Гн,  $M_{23}=8,99 \cdot 10^{-7}$  Гн. Тогда для петли, нагруженной на сопротивление 10 Ом, находим, что  $A=145$  мкВ/А. Амплитуда, определенная с помощью аппроксимирующей экспоненты (рис. 2б), равна 156 мкВ/А. При подключении к петле дополнительной индуктивности рассчитанное значение  $A$  равно 1,60 мкВ/А, а определенное с помощью экспоненты – 1,24 мкВ/А. В первом случае процентное расхождение составляет 8%, во втором – 23%.

Собственный переходный процесс измерительной системы является реакцией на импульс ЭДС, воздействующий на систему во время выключения тока в источнике. Амплитуда импульса тем больше, чем выше сопротивление подстилающей среды и чем больше взаимная индуктивность между генераторной и приемной петлями. С другой стороны, чем ниже электропроводность среды и чем меньше размер генераторной петли, тем быстрее спадает полезный сигнал. Поэтому проявления собственного переходного процесса системы отмечаются именно в тех случаях, когда небольшие установки применяются для изучения слабо проводящих геологических сред.

Проблемы, связанные с измерением на ранних временах, давно известны. Что касается измерений на поздних временах, то иногда сообщалось о переходных процессах, убывающих как  $1/t$ , которые не находили объяснения [1, 2, 5, 7]. Лишь недавно выяснилось, что эти процессы представляют собственный отклик измерительной системы [6].

*Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-00363 «Математическое моделирование и экспериментальное изучение индукционных переходных процессов тока в замкнутой горизонтальной петле с учетом влияния подстилающей среды».*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Monitoring Resistivity in Non-Hazardous Waste Landfill Using Time Domain Electromagnetism (Drôme, France) / M. Descloitres, J.-P. Laurent, Ch. Morra, R. Clément, L. Oxarango, J.-P. Gourc // Near Surface 2008: 14<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics: proceeding of the conf. (Kraków, Poland, 15 - 17 September 2008): – Kraków, Poland: EAGE, 2008 – 4 p.
2. Geidetzka A. Erste Erfahrungen mit der Nano TEM – Apparatur: diplomarbeit. – Köln: Institut für Geophysik und Meteorologie, 2002. – 105 p.
3. Kozhevnikov N.O. Testing TEM systems using a large horizontal loop conductor // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol. 53. – P. 1243–1251.
4. Sharlov M., Kozhevnikov N. Intrinsic response of a TEM measuring unit as cause of slowly decaying anomalous transients // Electromagnetic Induction in the Earth and Planetary Bodies: 24th EM Induction Workshop: proceeding of the conf. (Helsingør, Denmark, August 12-19, 2018). – Helsingør, Denmark: EMIW, 2018. – 4 p.
5. Sharlov M.V., Kozhevniko, N.O., Sharlov R.V. Lake Baikal – A Unique Site for Testing and Calibration of Near-surface TEM Systems // Near Surface Geoscience: conference & exhibition (Malmö, Sweden, 3-7 September 2017). – Malmö, Sweden, 2017. – 5 p.
6. Sharlov M.V., Kozhevnikov N.O., Shelokho, I.A. Unexpected dependence of the late-time transient response on the size and configuration of a TEM array // Engineering and Mining Geophysics – 2018. – Extended Abstract. – 10 p.
7. Sharlov M.V., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Agafonov Yu.A. Transient Electromagnetic Surveys for High-Resolution Near-Surface Exploration: Basics and Case Studies // First Break. – 2017. – Vol. 35. – P. 63 – 71.
8. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.

© Н. О. Кожевников, М. В. Шарлов, С. М. Стефаненко, 2019