

Аномальное замедление спада ЭДС индукционного переходного процесса при работе соосными установками с небольшими генераторными петлями

М.В. Шарлов* (АО «ИЭРП»), Н.О. Кожевников (ИНГГ СО РАН), И.А. Шелухов (АО «ИЭРП»)

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 или кондуктор, источники питания и транспорт.

В процессе возбуждения и измерения нестационарных электромагнитных полей переходная характеристика геологической среды сворачивается с откликом измерительной системы. Поэтому тестирование и/или калибровка измерительной системы является неотъемлемым этапом оценки качества и достоверности получаемых материалов.

Распространенным способом тестирования аппаратуры является подача на вход измерительного блока аппаратуры сигнала с контролируемыми параметрами. Чаще всего используется убывающее во времени напряжение, которое формируется специальным генератором эталонного сигнала. Иногда для создания эталонного сигнала используется физическое моделирование [Zakharkin, Tarlo, 1999].

Эти способы основаны на предположении, что система для нестационарных электромагнитных зондирований состоит из последовательно соединенных элементов: импульсного генератора тока, генераторной петли, измерительной петли и регистратора [Zakharkin, 1981]. При этом указанные компоненты рассматривают как линейные четырехполюсники с сосредоточенными параметрами [Vishnyakov, Vishnyakova, 1974; Zakharkin, 1981]. Полагают также, что параметры четырехполюсников взаимно независимы и постоянны во времени.

В последние годы все чаще используется подход, основанный на проведении съемок на эталонных участках, т.е. таких, геоэлектрическая модель которых достаточно изучена [Foged et al., 2013; Sapial et al., 2015]. Измеренные переходные характеристики сравниваются с рассчитанными для модели, которая предполагается известной. Разница между измеренной и модельной переходными характеристиками используется для оценки достоверности измерений, а также для учета влияния собственного отклика измерительной системы при интерпретации данных импульсной индуктивной электроразведки. В условиях высокоомной среды в качестве модели, по размерам сопоставимой с зондирующей установкой и реальными геологическими объектами, может использоваться петля из изолированного провода, нагруженная на известное сопротивление [Kozhevnikov, 2012].

Тестирование, основанное на измерении переходных характеристик геологических сред с известным геоэлектрическим строением, чаще всего используется для оценки собственного отклика системы на ранних временах, т.е. при изучении верхней части геологического разреза (ВЧР). Это связано с тем, что на ранних временах генераторная и приемная петли и аппаратура в совокупности с подстилающей их верхней частью геологического разреза (ВЧР) образуют единую систему с распределенными параметрами, компоненты которой взаимодействуют друг с другом [Kozhevnikov, 2009; Shi et al., 2016]. На результаты измерений влияют геоэлектрическое строение ВЧР, температура, метеоусловия, электромагнитные помехи и другие факторы.

Вместе с тем, наши исследования выявили некоторые особенности переходных характеристик, которые проявляются на поздних временах и не находят объяснения в рамках традиционной теории импульсной индуктивной электроразведки.

Напомним, что индукционные переходные характеристики и, соответственно, кривые кажущегося удельного сопротивления ρ_t зависят от разнosa r (половина длины стороны генераторной петли для соосной установки, расстояние между центрами генераторной и приемной петель – для разнесенной). На ранних временах это отличие тем больше, чем больше разнос и ниже удельное сопротивление [зондируемой] среды. С течением времени поперечный размер (d) области, занимаемой вихревыми токами, увеличиваются, при этом расхождение между переходными характеристиками уменьшается. В поздней стадии процесса становления ($d \gg r$) переходные характеристики не зависят от разнosa.

Согласно нашим исследованиям, при проведении зондирований соосными установками [петля в петле] характеристики на поздних временах совпадают, если первичное поле возбуждается большими петлями. Однако в тех случаях, когда размеры генераторной петли составляют $100 \text{ м} \times 100 \text{ м}$ и менее, может наблюдаться иная картина, при этом отличия сильнее проявляются для сред с большим удельным электрическим сопротивлением пород. Ниже мы проиллюстрируем эти отличия на конкретных примерах.

Для возбуждения и измерения переходных процессов использовалась цифровая телеметрическая аппаратура FastSnap [Sharlov et al., 2017]. Данная аппаратура позволяет выполнять измерения с высокой частотой дискретизации входного сигнала (до 40 МГц). Переходные характеристики записываются в базу данных в первоначальной форме с арифметическим шагом дискретизации, что предоставляет широкие возможности дальнейшей цифровой обработки и интерпретации. Возможности многоканальных измерений (до 4 каналов одновременно), вкупе с быстродействующим измерительным трактом и мощным коммутатором тока делают аппаратуру FastSnap подходящей для выполнения подобных исследований. На всем временном диапазоне регистрации переходных процессов контролировалось соотношение сигнал/шум, погрешность не превышала 5% для поздних времен записанных откликов.

Приольхонье. Западное Прибайкалье

На рис. 1 приведены результаты зондирований становлением поля в ближней зоне, выполненных в 2015 г. в Ольхонском районе Иркутской области на территории Прибайкальского Национального Парка, в нескольких километрах от п. Сахюрта. В геологическом отношении участок работ представлен амфиболитами и гнейсами ольхонского метаморфического комплекса.

Для возбуждения переходных процессов использовались квадратные петли с длиной стороны 50, 100, 200 и 500 м (далее по тексту ГП 50, ГП 100, ГП 200, ГП 500 соответственно) с общим центром, где располагалась приемная петля размером $10 \text{ м} \times 10 \text{ м}$ ($18 \text{ м} \times 18 \text{ м}$ для ГП 500). На рис. 1а показаны кривые кажущегося удельного сопротивления ρ_t для каждой установки. На временах более 0.5 – 1 мс кривые ρ_t для установок с ГП 500 и ГП 200 практически идентичны. По нашей просьбе Е.Ю. Антонов выполнил инверсию кривых ρ_t на основе модели горизонтально-слоистой проводящей среды. Соответствующие геоэлектрические модели для указанных установок показаны на рис. 1б. Как и следовало ожидать, они совпадают.

Для установки с ГП 100 значения ρ_t на временах, превышающих 1 мс, меньше тех значений, которые получены с большими генераторными петлями, причем с течением времени это расхождение увеличивается. Геоэлектрическая модель верхней части разреза близка к моделям для установок с большими петлями, однако на глубине свыше 400 м появляются слои с низким удельным сопротивлением, которые отсутствуют, если для инверсии использованы данные, измеренные установками с большими генераторными петлями.

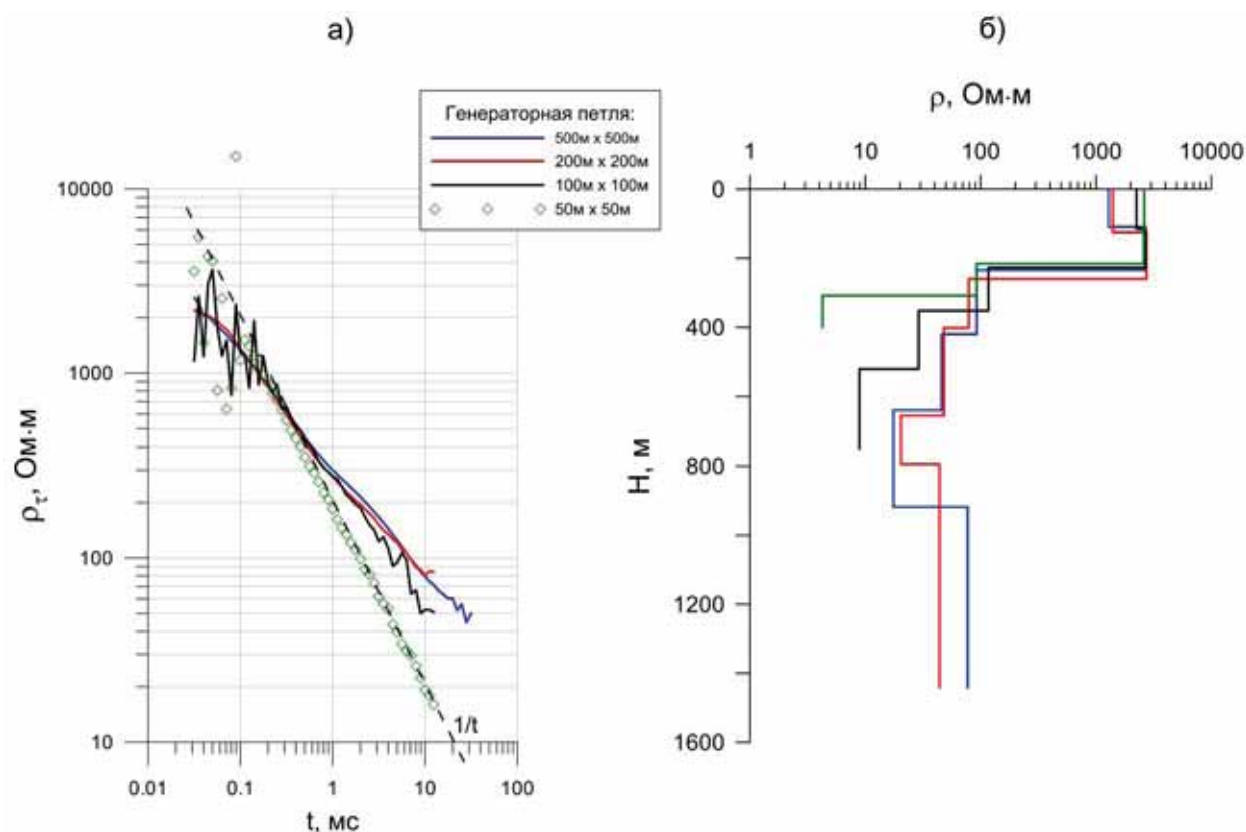


Рисунок 1. Кривые кажущегося удельного сопротивления (а) и соответствующие геоэлектрические модели (б). Приольхонье, 2015.

Еще заметнее отличается переходная характеристика, измеренная с генераторной петлей размером 50 м × 50 м: при $t > 1$ мс наблюдается очень быстрый, как $1/t$, спад кажущегося удельного сопротивления. В геоэлектрической модели это проявляется в виде слоя с необычно низким, порядка единиц Ом·м, удельным сопротивлением и глубиной залегания кровли около 350 м. С учетом имеющихся данных о геологии этой части Приольхонья и результатов предшествующих геофизических работ присутствие такого слоя представляется маловероятным.

Акватория о. Байкал

В 2017 г. для оценки влияния отклика системы на суммарную переходную характеристику авторами проведены работы на акватории о. Байкал, водная толща которого в широком временном диапазоне может рассматриваться как однородное полупространство с известным удельным сопротивлением. Измерения выполнены со льда ранней весной в районе п. Бол. Голоустное [Sharlov et al., 2017].

На рисунке 2 приведены кривые кажущегося удельного сопротивления, измеренные соосными установками с размерами генераторных петель 50 и 100 м (рис. 2а), а также полученные в результате их инверсии геоэлектрические модели (рис. 2б). Генераторные петли располагались в одном и том же месте с глубиной воды около 250 м.

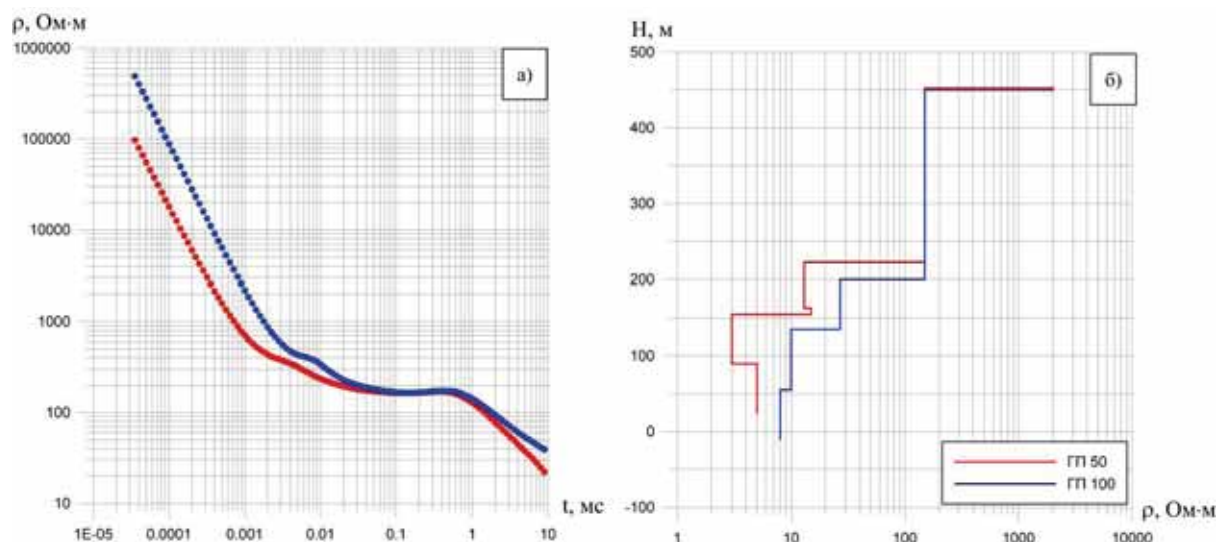


Рисунок 2. Байкал, 2017. Кривые кажущегося удельного сопротивления (а) и соответствующие геоэлектрические модели (б).

Хотя переходные характеристики для ГП 50 и ГП 100 измерены в одном и том же месте, их поведение на поздних временах, существенно различается. Соответствующие геоэлектрические модели в верхней части разреза совпадают вплоть до глубины 230 м, после чего в геоэлектрической модели для ГП 50 возникают слои с удельным сопротивлением, которое в 2 – 3 раза меньше по сравнению с теми слоями, которые соответствуют модели для ГП 100. Как и в случае, который иллюстрирует рис. 1, расхождение кривых не может быть объяснено геологическим строением участка работ.

Окрестности г. Иркутска, п. М. Еланка

Изучение влияния типа и размера установки на индукционные переходные характеристики было продолжено авторами зимой 2018 г. на участке недалеко от г. Иркутск, в районе поселка Малая Еланка. В геологическом отношении участок работ располагается на юге Иркутского амфитеатра в районе, где на поверхности залегают юрские породы кудинской свиты, представленные конгломератами, песчаниками, гравелитами, алевролитами, аргиллитами, с маломощными прослоями углей и вулканогенно-осадочными отложениями.

Участок работ был выбран на том основании, что геологическая среда и, соответственно, геоэлектрический разрез, здесь близки к горизонтально-слоистым. Для оценки возможных отклонений геоэлектрической модели участка работ от горизонтально-слоистой и азимутально-анизотропной была использована крестообразная установка с генераторными петлями наиболее часто употребляемых размеров (ГП 200, ГП 100, ГП 50). Схема установок приведена на рисунке 3. Каждая из генераторных петель раскладывалась на местности последовательно (одновременно была размотана только одна ГП), сигнал регистрировался с соосной (разнос 0 м), а также четырех разнесенных точек (с разносом, равным стороне ГП). Для регистрации переходных процессов использовались одновитковые приемные петли размером 10 м × 10 м.

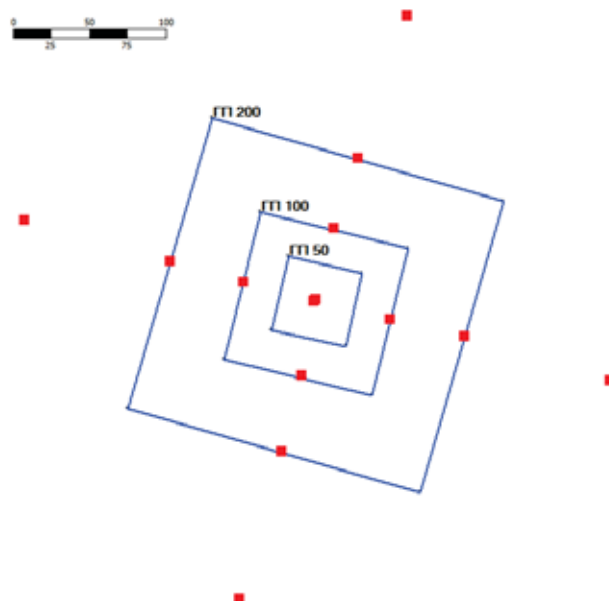


Рисунок 3. Малая Еланка, 2018. Схема расположения генераторных и приемных петель.

На рис. 4 приведены кривые кажущегося удельного электрического сопротивления, полученные соосной и четырьмя разнесенными установками в случае, когда для возбуждения переходных процессов использовалась петля размером 200 м × 200 м. На поздних временах кривые совпадают, что свидетельствует об отсутствии эффектов, связанных с горизонтальной неоднородностью и азимутальной анизотропией.

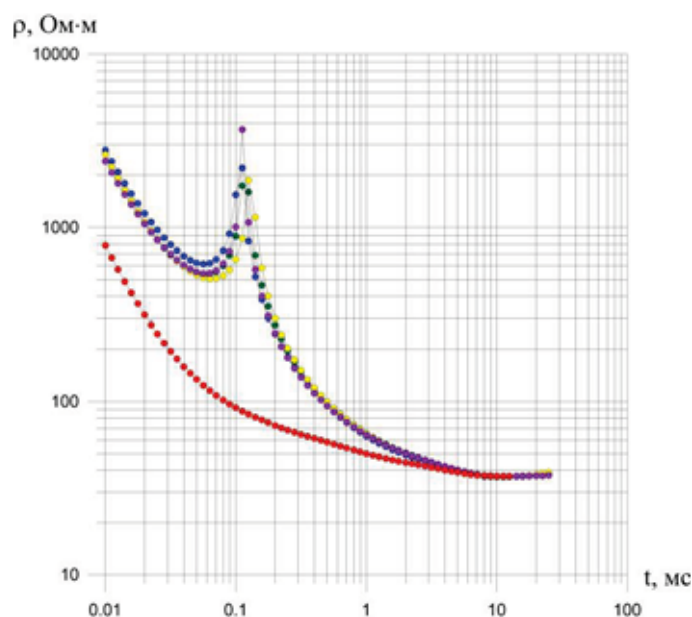


Рисунок 4. Малая Еланка, 2018. Кривые кажущегося удельного сопротивления, полученные с соосной и четырьмя вынесенными приемными петлями. Для возбуждения среды использовалась генераторная петля размером 200 м × 200 м.

Отметим, что кроме измерений с аппаратурой FastSnap мы выполнили несколько независимых наблюдений с аппаратурой Цикл-8. Результаты измерений совпали в пределах полевой погрешности (рис. 5). Данные FastSnap обрабатывались таким образом, чтобы соответствовать техническим параметрам системы Цикл (вводился аналогичный сдвиг момента выключения

тока, временной диапазон кривой, т.е. стартовое и конечное время, урезался до значений, полученных измерителем Цикл-8).

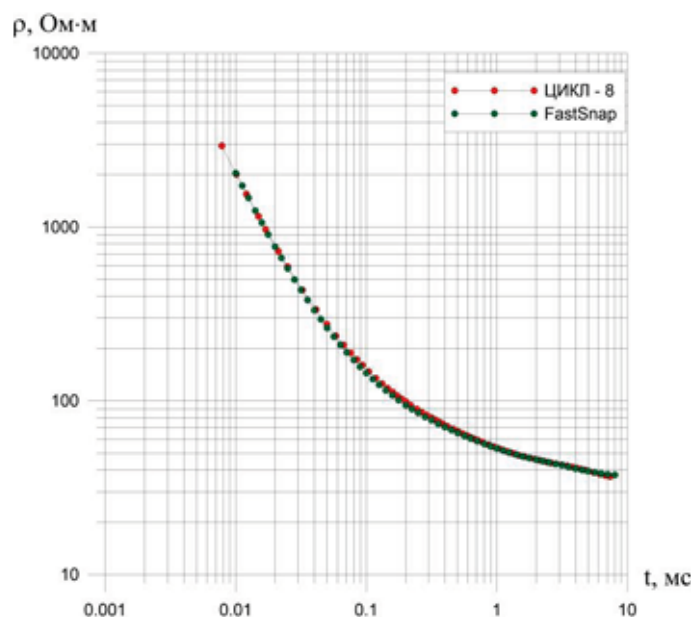


Рисунок 5. Малая Еланка, 2018. Кривые кажущегося удельного сопротивления, полученные соосной установкой (генераторная петля $200\text{ м} \times 200\text{ м}$) с аппаратурой FastSnap и Цикл-8.

Из-за меньшего магнитного момента переходные характеристики, измеренные соосной и разнесенными установками с генераторной петлей $100\text{ м} \times 100\text{ м}$ более короткие по сравнению с теми, которые были получены при использовании петли $200\text{ м} \times 200\text{ м}$. Однако можно видеть, что на поздних временах все кривые ρ_t совпадают (рис. 6). В отличие от Приольхонья (см. рис.1) для геоэлектрических условий участка работ понижение кривых кажущегося сопротивления и соответствующее замедление спада ЭДС не наблюдается (по крайней мере, на тех временах, где удалось зарегистрировать переходные характеристики).

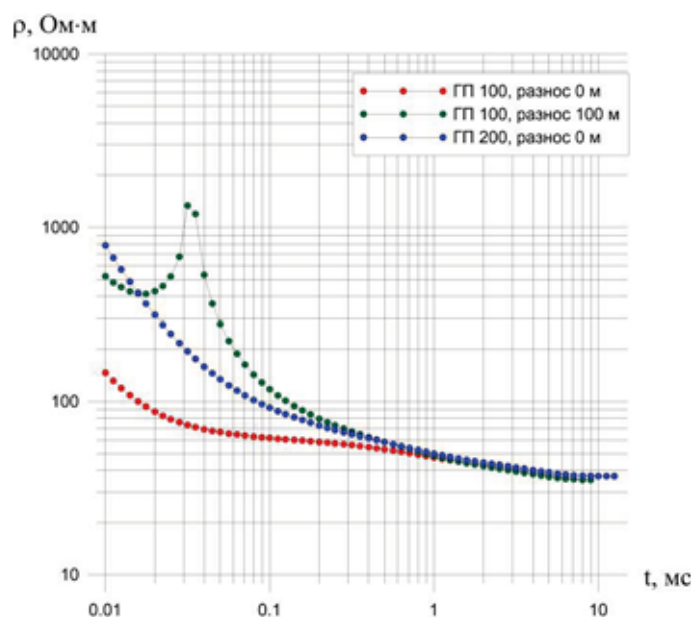


Рисунок 6. Сопоставление кривых кажущегося удельного сопротивления от ГП 100 и ГП 200.

Иная картина наблюдается при сравнении откликов для соосной и разнесенных установок с ГП 50 (см. рис. 7а). В середине временного диапазона (до времени 2 – 2.5 мс) кривые ρ_t совпадают, после чего отмечается понижение кажущегося удельного сопротивления для соосной установки. На рис. 7б показано сравнение кривых ρ_t установок с ГП 50 и ГП 200. Как можно видеть, кривая кажущегося сопротивления, измеренная разнесенной установкой с ГП 50, на поздних временах сливается с измеренной соосной кривой с ГП 200.

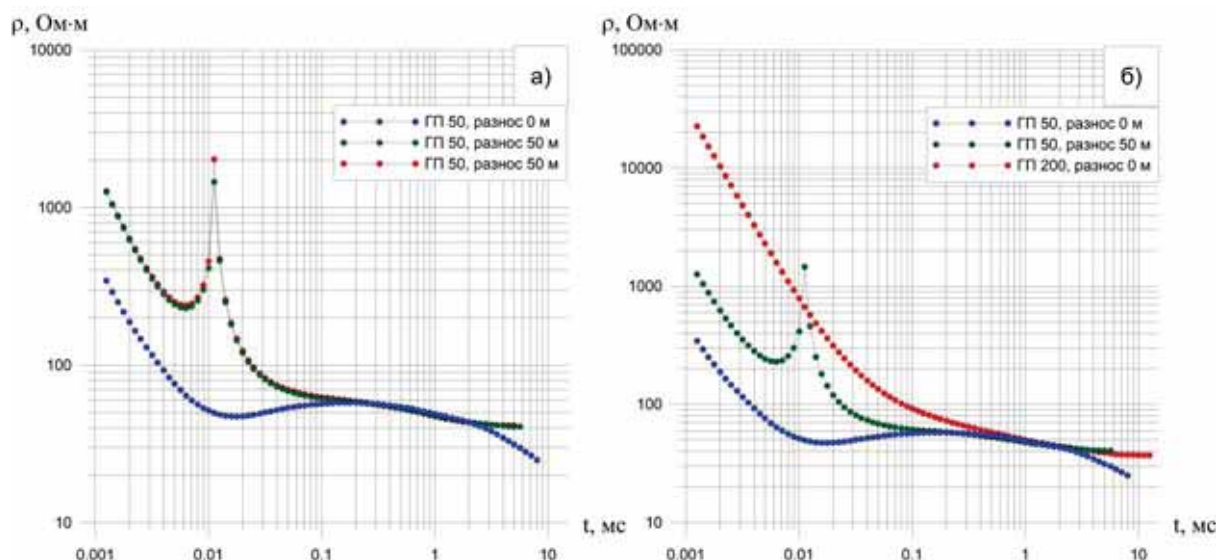


Рисунок 7. Малая Еланка, 2018. Кривые кажущегося удельного сопротивления для соосной и разнесенных установок с ГП 50 (а) и их сравнение с кривой для соосной установки с ГП 200 (б).

На рис. 8 показаны кривые кажущегося удельного электрического сопротивления для соосных установок с ГП 50 и ГП 200 и соответствующие геоэлектрические модели.

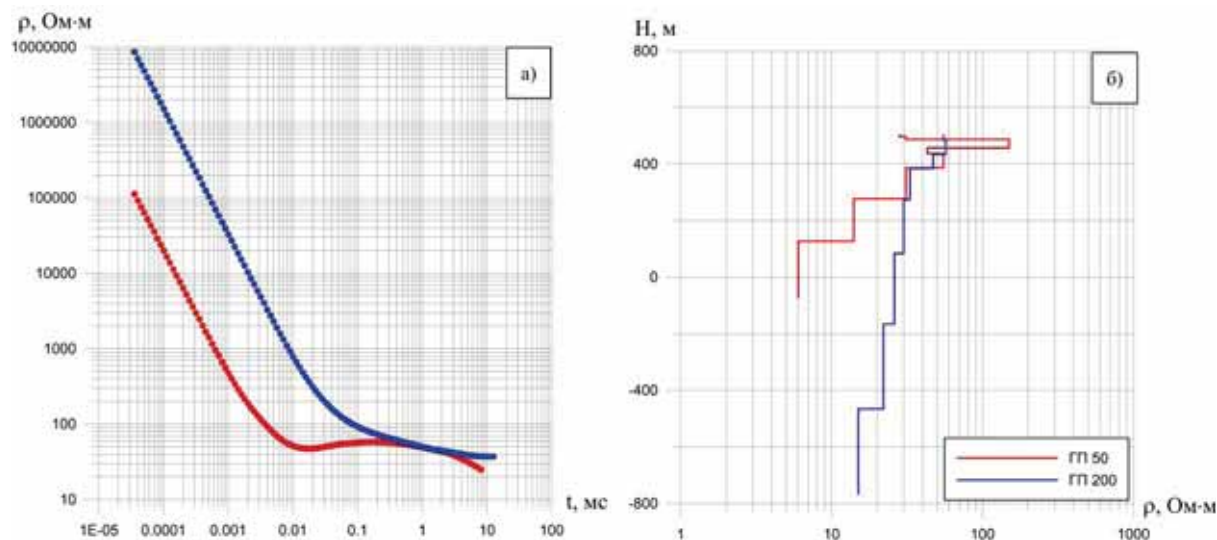


Рисунок 8. Малая Еланка, 2018. Кривые кажущегося сопротивления, полученные с соосных установок ГП 50 и ГП 200 (а) и соответствующие им геоэлектрические модели (б).

Как и в рассмотренных выше случаях, геоэлектрическая модель для соосной установки с ГП 50 отличается от моделей, найденных при инверсии данных, которые были получены большими установками. Начиная с глубины порядка 200 м, появляются слои с удельным сопротивлением, которое в несколько раз меньше по сравнению с сопротивлением для установки с ГП 200. Это

расхождение не связано с геологией участка работ и поэтому в настоящее время рассматривается нами как «артефакт», возникающий, когда для измерений на поздних временах используются соососные установки с генераторными петлями небольшого размера.

Обсуждение результатов

На ранних временах расхождение между переходными характеристиками можно объяснить присутствием в окрестностях генераторной петли двух или трехмерных неоднородностей и другими эффектами. Однако на поздних временах, когда диаметр кольца вихревых токов намного превосходит размеры самой большой из использовавшихся установок, зависимость от разноса уменьшается и в пределе (при $t \rightarrow \infty$) должна исчезнуть.

Обычно спад удельного электрического сопротивления, описываемый зависимостью $1/t$, рассматривается как проявление магнитной вязкости геологической среды. Известно также, что эффекты магнитной вязкости при использовании соосных установок проявляются тем раньше и тем заметнее, чем – при неизменном размере приемника – меньше размер генераторной петли [Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Для расчета индукционных переходных процессов в средах с магнитной вязкостью используется способ, основанный на решении уравнения Гельмгольца. Решение отыскивается в частотной области с учетом зависимости магнитной восприимчивости от частоты, после чего осуществляется трансформация во временную область. Магнитная восприимчивость рассчитывается по формуле:

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

где ω – круговая частота, $j=(-1)^{1/2}$; τ_1 , τ_2 – нижняя и верхняя границы диапазона времен релаксации намагниченности; $\Delta\kappa$ – декремент магнитной восприимчивости, т.е. разница между ее значениями на низкой ($\omega < 1/\tau_2$) и высокой ($\omega > 1/\tau_1$) частотах. Как показали расчеты, для того, чтобы объяснить наблюдающиеся эффекты (см. рис. 1, 2, 7, 8) проявлениями магнитной вязкости, необходимы значения $\Delta\kappa$, которые наблюдаются преимущественно в районах развития траппов и туфов. Однако на участках, где проводились опытные работы, нет таких пород.

Поэтому логично предположить, что быстрое убывание кажущегося удельного сопротивления и, соответственно, медленный спад ЭДС в приемной петле, представляет собой переходный процесс измерительной системы. В настоящее время остается невыясненным, где именно и почему возникает этот процесс. Отметим лишь, что согласно нашим исследованиям обсуждаемый эффект наблюдается независимо от используемой аппаратуры.

Отметим, что ранее «затягивание» спада ЭДС, когда исследования проводятся соосной установкой с небольшой генераторной петлей, не отмечалось. Это связано с тем, что измерения заканчивались на временах, когда эффект еще не проявлялся. Современные программно-аппаратные средства импульсной индуктивной электроразведки обеспечивают уверенную регистрацию сигналов становления очень низкого – порядка 0.01 мкВ/А и менее – уровня. Благодаря этому стало возможным даже с небольшими установками измерять переходные процессы на временах, когда проявляется замедление спада ЭДС. Другая причина заключается в том, что раньше при работах методом переходных процессов или зондирования становлением поля измерения с многоразносными установками проводились редко. В настоящее время такие установки находят все более широкое применение, благодаря чему стало возможным проявление обсуждаемого в статье эффекта.

Отметим, что, просматривая данные прошлых лет, можно заметить затягивание спада ЭДС на переходных характеристиках, измеренных соосными установками небольшого размера [Geidetzka, 2002].

Выводы

При выполнении зондирований становлением поля соосными установками с генераторными петлями небольшого размера наблюдается замедление спада ЭДС. Этот эффект не связан с геологией и при прочих равных условиях тем заметнее, чем меньше размер генераторной петли и чем выше удельное электрическое сопротивление геологической среды. Если измерительная петля располагается снаружи генераторной, эффект не наблюдается. Пока не выяснено, с чем связано замедление спада переходной характеристики при работе с соосными установками небольшого размера. Для того, чтобы ответить на этот вопрос, нужны дальнейшие исследования. В настоящее время можно лишь констатировать, что ЭДС, измеренная такими установками на поздних временах, не связана с геоэлектрическим строением среды.

Благодарности

Исследования выполнены при частичной 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».

Авторы благодарны специалистам АО «Иркутскгеофизика» В. Тупицыну и П. Минову за предоставленную аппаратуру Цикл-8 и помощь в выполнении соответствующих измерений на участке работ в районе п. М.Еланка.

Библиография

- Foged, N., Auken, E., Christiansen, A.V., and Sørensen, K. I., 2013, Test-site calibration and validation of airborne and ground-based TEM systems // *Geophysics*, VOL. 78, NO. 2, P. E95–E106.
- Geidetzka, A., 2002, Erste Erfahrungen mit der Nano TEM - Apparatur. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie: Köln.
- Kozhevnikov, N.O., 2009, Applying the transmission line theory to study ungrounded horizontal loop self-transients // *Russian Geology and Geophysics*, 50, 222–233.
- Kozhevnikov, N.O., 2012, Testing TEM systems using a large horizontal loop conductor // *Russian Geology and Geophysics*, 53, 1243–1251.
- Kozhevnikov, N.O., Antonov, E.Yu., 2008, The magnetic relaxation effect on TEM responses of a uniform earth // *Russian Geology and Geophysics*, 49, 197–205.
- Lavoue, F., J. Van Der Kruk, J. Rings, F. Andre, D. Moghadas, J. A. Huisman, S. Lambot, L. Weihermüller, J. Vanderborght, and H. Vereecken, 2010, Electromagnetic induction calibration using apparent electrical conductivity modelling based on electrical resistivity tomography: *Near Surface Geophysics*, 8, 553–561.
- M.V. Sharlov, N.O. Kozhevnikov, R.V. Sharlov, Lake Baikal – A Unique Site for Testing and Calibration of Near-surface TEM Systems // *Near Surface Geoscience* 3-7 September 2017, Malmö, Sweden. 5 pp. doi: 10.3997/2214-4609.201702038
- Sapia1 V., Viezzoli A., Menghini A., Marchetti M., Chiappini M. 2015. The Italian reference site for TEM methods. *Annals of Geophysics*, 58, 5, G0548; doi:10.4401/ag-6805
- Sharlov, M.V., Buddo, I.V., Misyurkeeva, N.V., Shelokhov, I.A., Agafonov, Yu.A., 2017. Experience of efficient near-surface studies by the shallow TEM method using the Fastsnap system. *Pribory i Sistemy Razvedochnoi Geofiziki* 38 (2), 8 – 23.

- Sharlov, M.V., Buddo, I.V., Misyurkeeva, N.V., Shelokhov, I.A., Agafonov, Yu.A., 2017. Transient Electromagnetic Surveys for High-Resolution Near-Surface Exploration: Basics and Case Studies. *FirstBreak*, Vol. 35, September 2017, 63 – 71.
- Vishnyakov, A.E., Vishnyakova, K.A., 1974, Excitation and measurement of electric and magnetic fields in EM prospecting methods. Nedra, Moscow.
- Zakharkin, A.K., 1981, Manual on TEM surveys with the TSIKL instrument. SNIIGGiMS, Novosibirsk.
- Zakharkin, A.K., Tarlo, N.N., 1999, Metrological support of TEM measurements // *Geofizika*, N6, 34 – 39.
- Zongyang Shi, Lihua Liu, Pan Xiao, Zhi Geng, Fubo Liu, and Guangyou Fang, 2016, Simulation and Analysis of the effect of ungrounded rectangular loop distributed parameters on TEM response. *Journal of Applied Geophysics*. doi:[10.1016/j.jappgeo.2017.12.018](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.12.018)

Контактная информация

Корреспондирующий автор: Шарлов Максим Валерьевич, email: smv@ierp.ru