

ВЫКЛЮЧЕНИЕ ТОКА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛЕ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ

Н.О. Кожевников

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

Незаземленная горизонтальная петля, используемая в качестве источника в методе переходных процессов, в совокупности с подстилающей ее верхней частью разреза образуют систему с распределенными параметрами. На поздних временах и/или низких частотах для ее описания и анализа целесообразно использовать модель эквивалентного контура с сосредоточенными параметрами. На временах, сравнимых с периодом собственных колебаний тока в петле, модель в виде эквивалентного контура не объясняет экспериментальные данные. Их анализ свидетельствует о том, что в области ранних времен петля может быть представлена в виде комбинации двух длинных линий, образованных проводом петли и подстилающей его геологической средой. Такое представление петли позволяет, воспользовавшись средствами теории длинных линий, рассчитать ток для любого момента времени в любой точке петли. Поскольку на ранних временах параметры генераторной петли зависят от геоэлектрического разреза и окружающей обстановки, такое понятие как «первичное поле источника» применительно к измерениям на ранних временах теряет смысл. Поэтому инверсия индукционных переходных характеристик в области ранних времен на основе теории и моделей традиционной импульсной индуктивной электроразведки не представляется возможной. Однако, как показано на примере петли, шунтированной согласующим резистором, модель, основанная на теории длинных линий, позволяет решить обратную задачу, а именно подобрать параметры линий и сопротивление подстилающей среды, при которых модельные графики выключения тока близки к измеренным.

Метод переходных процессов, горизонтальная петля, выключение тока, ранние времена, длинная линия, обратная задача.

CURRENT TURN-OFF IN AN UNGROUNDED HORIZONTAL LOOP: EXPERIMENT AND THEORY

N.O. Kozhevnikov

An ungrounded horizontal loop, a common transmitter type in TEM surveys, makes up a system with distributed parameters with the earth under it. It can be simulated by an equivalent circuit with lumped parameters at late times and/or low frequencies, but at early times commensurate with the period of free current oscillations, the lumped circuit model fails to account for experimental data. At high frequencies and/or early times, the wire, in combination with the underlying earth, forms a transmission line in which current behaves according to the wave equation. This model allows calculating the current at any time and at any loop point with reference to the theory of long transmission lines. At early times, the loop self-responses depend on near-surface resistivity and environment and its primary magnetic field differs from that predicted by the classical theory of TEM surveys. Therefore, inversion of early-time response in terms of the conventional TEM system model is meaningless. However, as illustrated with a loop shunted by a matching resistor, the loop model as a combination of two transmission lines enables the inversion of the early-time current response in terms of the line parameters and near-surface resistivity.

TEM surveys, horizontal loop, current turn-off, early times, transmission line, inversion

ВВЕДЕНИЕ

Незаземленная горизонтальная петля, используемая для возбуждения индукционных переходных процессов в земле, является неотъемлемым элементом систем для импульсной индуктивной электроразведки. При выключении тока в петле в окружающем ее пространстве возникает вихревое электрическое поле, под действием которого в земле возникают вихревые токи, после чего, в отсутствие первичного поля источника, измеряется создаваемое этими токами вторичное магнитное поле или чаще — с помощью приемной петли или рамки — его производная.

В процессе измерения переходная характеристика земли сворачивается с переходными характеристиками генераторной и приемной петель [Захаркин, 1981; Asten, 1987]. Поэтому при решении пря-

мых и обратных задач импульсной индуктивной электроразведки необходимо учитывать особенности выключения тока в генераторной петле и собственный переходный процесс в приемной. Анализ влияния собственного отклика приемной петли и/или рамки посвящены [Вишняков, Вишнякова, 1974; Ефимов, 1976; Quian, 1985; Николаев и др., 1988; Кожевников, Плотников, 2004; Schamper et al., 2014; Yu et al., 2014] и другие работы. Влияние конечного времени выключения тока в генераторной петле, формы токового импульса и способы учета этого влияния рассмотрены в [Соколов и др., 1978; Raiche, 1984; Asten, 1987; Fitterman, Anderson, 1987]. В перечисленных работах для моделирования собственного отклика незаземленной горизонтальной петли используется эквивалентный контур с сосредоточенными параметрами.

В последние 10—15 лет в связи с потребностями малоглубинной геофизики становятся актуальными измерения переходных характеристик на все более ранних временах. Очевидно, снижение начального времени регистрации влечет за собой необходимость уменьшения длительности выключения тока в генераторной петле. Однако на этом пути имеются ограничения как технического [Плотников, 2014], так и принципиального характера. К числу последних следует отнести тот факт, что на ранних временах и/или высоких частотах модель петли в виде контура с сосредоточенными параметрами не в состоянии объяснить результаты экспериментов [Kozhevnikov, Nikiforov, 1998, 2000; Кожевников, 2006]. Ниже перечислены известные на сегодняшний день экспериментальные результаты, для интерпретации которых необходимо использовать модель петли в виде системы с распределенными параметрами.

1. Входной импеданс петли зависит от частоты так же, как входной импеданс закороченной на выходе длинной линии [Kozhevnikov, Nikiforov, 1998, 2000; Кожевников, 2006].

2. После того как зажимы петли отключены от источника тока, в ней — если она не шунтирована согласующим резистором — возникают затухающие во времени стоячие волны тока и напряжения [Kozhevnikov, Nikiforov, 1998, 2000; Helwig, Kozhevnikov, 2003; Кожевников, 2006].

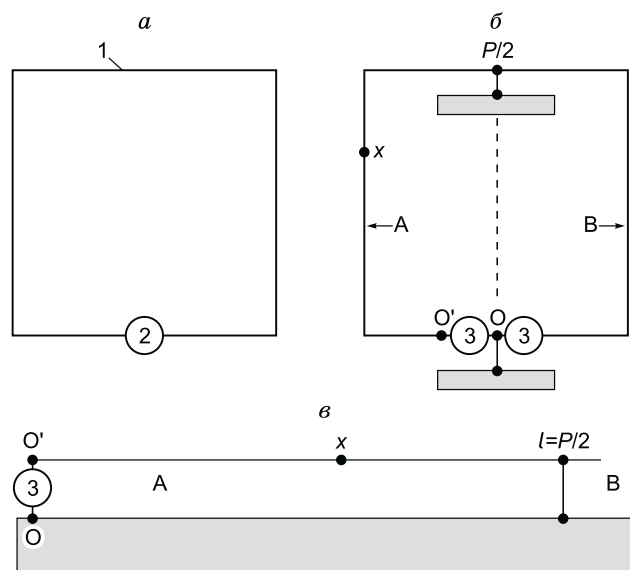
3. Ток в разных участках провода не выключается одновременно, или синфазно: чем дальше удален участок провода от зажимов петли, тем с большей задержкой выключается ток [Helwig, Kozhevnikov, 2003; Кожевников, 2009].

Перечисленные результаты свидетельствуют о том, что на ранних временах и/или высоких частотах петля в совокупности с подстилающей ее верхней частью разреза (ВЧР) характеризуется свойствами, типичными для *длинной линии* [Kozhevnikov, Nikiforov, 1998, 2000; Кожевников, 2006, 2009].

Основные положения теории длинных линий применительно к анализу и расчету выключения тока в горизонтальной незаземленной петле достаточно подробно изложены в публикациях [Кожевников, 2006, 2009], поэтому далее приводится только их краткая сводка.

МОДЕЛЬ ПЕТЛИ В ВИДЕ КОМБИНАЦИИ ДВУХ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

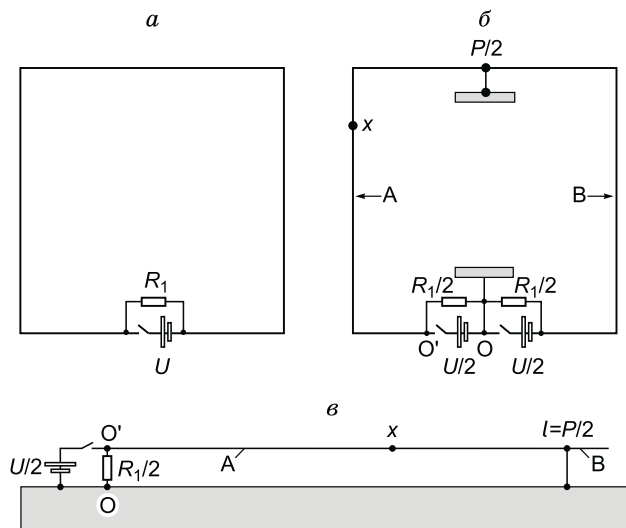
На первый взгляд может показаться, что длинная линия, образованная землей и расположенным на ней проводом, имеет мало общего с незаземленной горизонтальной петлей. Однако благодаря симметрии петля может быть представлена в виде двух идентичных длинных линий, которые включены последовательно таким образом, что общая точка, где выходы линий встречаются, заземлена. Источник тока и/или напряжения также можно представить в виде комбинации двух идентичных последовательно соединенных источников, общая точка которых заземлена. Такой способ представления петли иллюстрирует рис. 1, а, где изображена расположенная на поверхности земли квадратная петля с подключенным к ней источником. Длина провода, образующего петлю, равна P . На рис. 1, б показано, каким образом петля и источник могут быть представлены в виде двух идентичных линий длиной $P/2$ каждая, включенных последовательно. В то время как на рис. 1, а цифра 2 символизирует источник с выходным напряжением U и внутренним сопротивлением R_i , на рис. 1, б, цифрой 3 отмечены источники с выходным напряжением $U/2$ и внутренним сопротивлением $R_i/2$ каждый.



рирует рис. 1, а, где изображена расположенная на поверхности земли квадратная петля с подключенным к ней источником. Длина провода, образующего петлю, равна P . На рис. 1, б показано, каким образом петля и источник могут быть представлены в виде двух идентичных линий длиной $P/2$ каждая, включенных последовательно. В то время как на рис. 1, а цифра 2 символизирует источник с выходным напряжением U и внутренним сопротивлением R_i , на рис. 1, б, цифрой 3 отмечены источники с выходным напряжением $U/2$ и внутренним сопротивлением $R_i/2$ каждый.

Рис. 1. Горизонтальная незаземленная петля 1 с источником 2 (а); те же петля и источник, представленные в виде двух идентичных линий А, В и источников 3 (б); закороченная на выходе линия длиной $l = P/2$ (в).

Рис. 2. Горизонтальная незаземленная петля с источником напряжения U , ключом и шунтирующим резистором R_1 (а); та же петля, источник и шунтирующий резистор, представленные в виде двух идентичных линий А и В, источников и резисторов (б); закороченная на выходе линия А (в).



Поскольку представленная на рис. 1, б система симметрична, точки O и удаленная от нее на расстояние $P/2$ имеют одинаковый потенциал. Если соединить их с землей, это не повлияет на распределение напряжения вдоль провода петли. Поэтому можно предположить, что на ранних временах и/или высоких частотах параметры незаземленной петли с периметром P могут быть получены на основе анализа закороченной на выходе однопроводной линии длиной $l = P/2$ (см. рис. 1, в).

Этот подход применительно к импульсной индуктивной электроразведке иллюстрирует рис. 2. Последовательно с петлей включены источник напряжения U и ключ (см. рис. 2, а). В петле протекает установившийся ток I_0 . Параллельно петле может быть подключен шунтирующий резистор с сопротивлением R_1 . В момент времени t_0 ключ размыкается, и ток, поступающий от батареи, становится равным нулю. Эта же петля в виде комбинации двух линий показана на рис. 2, б. К входу каждой из линий подключен источник с напряжением $U/2$, резистор с сопротивлением $R_1/2$ и ключ. В момент времени $t = 0$ каждый из ключей отсоединяет «свою» линию от «своего» источника. Поскольку вследствие симметрии петли точки O и $P/2$ имеют одинаковый потенциал, их можно заземлить. Это позволяет свести задачу выключения тока в петле к его выключению в длинной линии (см. рис. 2, в).

Важнейшими параметрами, используемыми для описания и анализа длинных линий, являются коэффициент распространения $\dot{\gamma}$ и волновое сопротивление \dot{Z} . Знание этих, так называемых вторичных, параметров, которые в общем случае являются комплексными и зависящими от частоты, позволяет полностью описать свойства линии. Коэффициент распространения $\dot{\gamma}$ обычно записывают в виде

$$\dot{\gamma} = \alpha + j\beta,$$

где $j = \sqrt{-1}$, α — коэффициент затухания, β — коэффициент фазы (фазовая постоянная). Эти величины имеют одинаковые размерности — $1/\text{м}$.

Если известны первичные параметры линии, т.е. погонные индуктивность L , емкость C , сопротивление R и проводимость изоляции G , то коэффициенты α и β вычисляются по формулам [Шимони, 1964; Баскаков, 1980]:

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{2}(RG - \omega^2 LC) + \frac{1}{2}[(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)]^{1/2} \right\}^{1/2},$$

$$\beta = \left\{ \frac{1}{2}(\omega^2 LC - RG) + \frac{1}{2}[(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)]^{1/2} \right\}^{1/2},$$

где ω — круговая частота тока и напряжения в линии.

Волновое сопротивление \dot{Z} удобно представлять как произведение модуля Z_0 на фазовый множитель ψ :

$$\dot{Z} = Z_0 e^{j\psi},$$

$$Z_0 = \left(\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2} \right)^{1/4},$$

$$\psi = \arg \dot{Z} = \frac{1}{2} \arctg \frac{G/(\omega C) - R/(\omega L)}{1 + (GR)/(\omega^2 LC)}.$$

ВЫКЛЮЧЕНИЕ ТОКА В ИДЕАЛЬНОЙ ПЕТЛЕ: РЕЖИМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Полный анализ работы линий, образующих петлю, с учетом зависимости их первичных параметров от частоты и свойств ВЧР представляет сложную задачу. Однако даже простая модель петли в виде комбинации двух идеальных линий (т.е. таких, в которых отсутствуют потери, а первичные параметры не зависят от частоты и свойств подстилающей среды) позволяет увидеть разницу между выключением тока в петле и в контуре с сосредоточенными параметрами. Сначала рассмотрим выключение тока в петле, «предоставленной самой себе», т.е. не шунтированной ($R_1 = \infty$).

Известным приемом, позволяющим «увидеть», что происходит в различных точках провода идеальной петли после ее отключения от источника, является представление процесса выключения тока в виде суперпозиции волн, распространяющихся в противоположных направлениях в длинной линии, образованной проводом петли и подстилающей ее землей [Шалыт, 1982]. Предположим, что один из зажимов петли расположен в начале отсчета, а расстояние, отсчитываемое от этого зажима вдоль провода соответствует координате x (см. рис. 1, а, 2, а). Тогда координата другого зажима равна периметру петли P . В момент, когда источник отключается от петли, в каждой из линий, образующих петлю, возникает волна тока в виде «ступени», амплитуда которой в рассматриваемом случае ($R_1 = \infty$) равна току, протекавшему в проводе до отключения петли от источника (рис. 3, а). Направление же тока, образующего волну, противоположно по отношению к тому, которое имел ток, поступавший от батареи до размыкания ключа (отрицательная «ступень» тока). Каждая волна распространяется от соответствующего зажима петли к точке $x = P/2$. Когда волна достигает средней точки петли, которая имеет нулевой потенциал и поэтому может рассматриваться как заземленная, возникает отраженная волна, бегущая от центральной точки к зажиму петли. При этом полный ток в линии представляет сумму установившегося тока и двух волн: первая распространяется от зажима петли к ее центру, вторая — от центральной точки к зажиму. Когда отраженная волна достигнет зажима петли, она вновь отразится, поскольку в этой точке линия провод—ВЧР разомкнута, т.е. нагружена на бесконечное сопротивление. С этого момента распределение тока в каждой из линий равно сумме трех бегущих волн и установившегося тока. В дальнейшем произойдут новые отражения, суперпозиция бегущих в обоих направлениях волн приведет к образованию стоячей волны с периодом T . В идеальной линии такой процесс продолжается неопределенно долго.

Мгновенные «снимки» распределения тока $I(x)$ по периметру идеальной петли в фиксированные моменты времени (см. рис. 3, а) и графики $I(t)$ для различных точек периметра петли (см. рис. 3, б) свидетельствуют о том, что в отличие от постулируемого в традиционной теории импульсной индуктивной электроразведки одновременного выключения тока имеет место *запаздывание*. Вследствие этого на ранних временах распределение тока в петле симметрично относительно оси Y , однако симметрия отсутствует по отношению к оси X . Поэтому в случае, если окружение петли несимметрично (например, она располагается на поверхности электрически несимметричной земли), переходная и/или частотная характеристика петли в принципе может зависеть от места подключения генератора тока.

ОТЛИЧИЕ МЕЖДУ ИДЕАЛЬНОЙ И РЕАЛЬНОЙ ПЕТЛЯМИ

Реальные линии, образующие петлю, характеризуются потерями, а также частотной дисперсией первичных и, соответственно, вторичных параметров. Методы расчета таких линий в частотной области подробно описаны в литературе [Баскаков, 1980; Джонсон, Грэхем, 2005]. Поэтому при расчете переходного процесса тока в петле сначала отыскивалось решение в частотной области, которое затем преобразовывалось во временную область.

При моделировании выключения тока в петле можно принять, что погонные емкость C и проводимость изоляции G не изменяются при изменении удельного сопротивления ρ земли и частоты ω , тогда как погонные сопротивление R и индуктивность L зависят от ρ и ω , и это необходимо учитывать в расчетах [Кожевников, 2009].

В работах [Кожевников, 2006, 2009] приводятся результаты измерения собственных колебаний тока в нескольких точках периметра нешунтированной петли размером 200×200 м из провода ГПМП. Как показал анализ этих результатов, при расчете комплексного погонного сопротивления провода следует учитывать три слагаемых [Кожевников, 2009]:

$$\dot{Z}_{\text{пп}} = R_{\text{пп}} + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 \quad (1)$$

В этом выражении $R_{\text{пп}}$ — «собственное» погонное активное сопротивление провода. На низких частотах $R_{\text{пп}}$ равно сопротивлению провода на постоянном токе $R_{\text{пост}}$, на высоких частотах на $R_{\text{пп}}$ влияет скин-эффект в проводе. Для расчета $R_{\text{пп}}$ с учетом скин-эффекта в проводе использовались известные формулы [Шимони, 1964]:

$$R_{\text{пп}} = R_{\text{пост}} \left(1 + \frac{\theta^4}{3} \right) \text{ для } \theta < 1, \quad (2a)$$

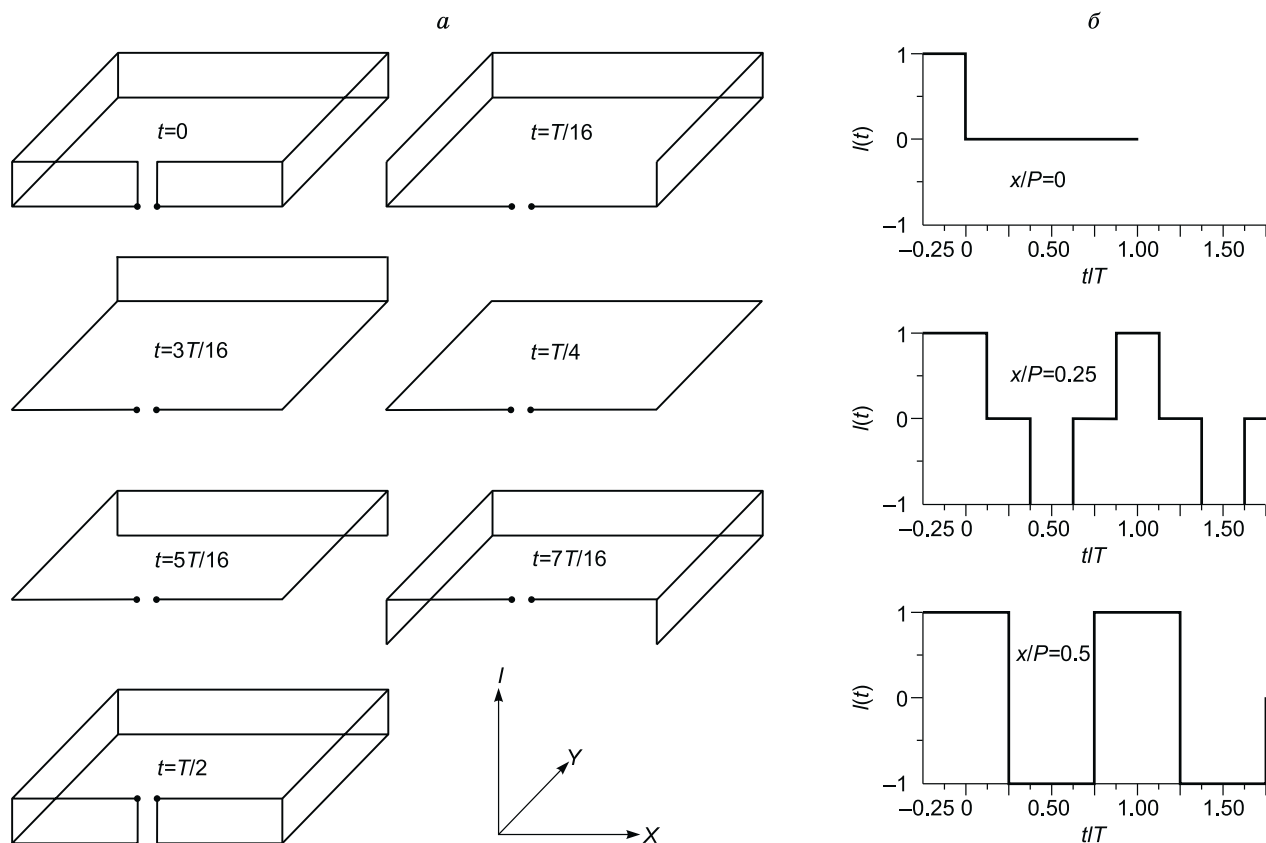


Рис. 3. Выключение тока в идеальной петле, к которой не подключен шунтирующий резистор ($R_1 = \infty$):

a — распределение тока по периметру петли для фиксированных моментов времени; *б* — изменение тока в зависимости от времени в некоторых точках периметра петли. Отключение источника тока от петли происходит в момент $t = 0$.

$$R_{\text{пр}} = R_{\text{пост}} \left(\theta + \frac{1}{4} + \frac{3}{64\theta} \right) \text{ для } \theta > 1, \quad (26),$$

где $\theta = (r_{\text{пр}} / 2\delta_{\text{пр}})$; $\delta_{\text{пр}} = \sqrt{2/(\omega\mu_{\text{пр}}\sigma_{\text{пр}})}$; $r_{\text{пр}}$ — радиус провода; $\mu_{\text{пр}}$ — абсолютная магнитная проницаемость, $\sigma_{\text{пр}}$ — удельная электропроводность материала провода. Для $\theta = 1$ $R_{\text{пр}}$ рассчитывалось как среднее из двух значений, вычисленных по формулам (2а), (2б).

Второе слагаемое (\dot{Z}_1) в выражении (1) учитывает взаимодействие тока в проводе с его «изображением» в земле. Согласно [Wang, Liu, 2001],

$$\dot{Z}_1 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi 0} \ln \frac{2(h+p)}{r_{\text{пр}}}.$$

Здесь, $p = \delta(2j)^{-1/2}$, $\delta = \sqrt{2(\sigma\omega\mu)}$, где σ — удельная электропроводность, μ — абсолютная магнитная проницаемость земли.

Наконец, третье слагаемое (\dot{Z}_2) определяет ту часть погонного импеданса провода, которая связана с индуктивным взаимодействием между образующими петлю линиями. Основываясь на работе [Соболев, Шкарлетт, 1967], можно принять, что для однородной проводящей земли [Кожевников, 2009]

$$\dot{Z}_2 = \frac{6 \cdot 10^{-7} \omega a}{\beta^2} 3 \left(3 - \sqrt{9 + 4j\beta^2} \right),$$

где $\beta = a\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$, $a = A/\pi$, A — длина стороны квадратной петли.

Относительный вклад, вносимый в полное сопротивление провода за счет индуктивной связи между двумя линиями (\dot{Z}_2), меньше по сравнению с тем, который вносит «ток-изображение». Однако

именно эта составляющая зависит от удельного электрического сопротивления подстилающей среды, что делает возможной оценку удельного сопротивления и, возможно, поляризуемости ВЧР.

Очевидно, погонные сопротивление и индуктивность провода с учетом токов в земле и скин-эффекта в проводе составляют:

$$R = \operatorname{Re} \dot{Z}_{\text{пр}}, \quad L = \frac{\operatorname{Im} \dot{Z}_{\text{пр}}}{j\omega}.$$

Зная эти параметры, можно рассчитать ток в линии в частотной области и затем, выполнив обратное преобразование Фурье, перейти во временную область, т.е. найти, как выключается ток в любой точке линии и, соответственно, петли.

Изучение свободных колебаний тока в незаземленной петле, называемых также «звоном», позволяет оценивать параметры, описывающие петлю как систему с распределенными параметрами. В принципе, «звон» петли можно использовать как источник информации о ВЧР [А.с...., 1991; Кожевников, 2011]. Поэтому изучение колебаний тока в генераторной петле в зависимости от ее геометрии, используемой аппаратуры, ландшафтных и погодных условий, а также геоэлектрических параметров ВЧР может представлять интерес для теории и практики импульсной индуктивной электроразведки. Однако в большинстве случаев «звон» рассматривают как помеху, которую стремятся минимизировать путем шунтирования петли резистором [Ванчугов, Кожевников, 1998]. Известна также попытка добиться снизить влияние звона с помощью специальных методов обработки [Шарлов и др., 2010].

ВЫКЛЮЧЕНИЕ ТОКА В ПЕТЛЕ: РЕЖИМ СОГЛАСОВАНИЯ

Если на входе петли обеспечить условия согласования, бегущие от центральной точки волны не отразятся на зажимах петли, и процесс выключения тока закончится (рис. 4). Для этого необходимо подключить к петле резистор R_1 с сопротивлением, равным удвоенному характеристическому сопротивлению Z_0 линии провод—земля на высоких частотах. Как показали измерения, для расположенного на поверхности земли провода ГППИ или близкого к нему по параметрам, в большинстве случаев R_1 составляет 350—500 Ом [Kozhevnikov, Nikiforov, 1998, 2000; Helwig, Kozhevnikov, 2003; Кожевников, 2006, 2009; Kozhevnikov, Helwig, 2014].

На рис. 4, *a* показаны мгновенные «снимки» распределения тока в идеальной петле, шунтированной согласующим резистором R_1 (на рисунке не показан), в различные моменты после ее отключения от источника. Рис. 4, *b* иллюстрирует форму выключения тока в различных точках периметра петли. Как и при $R_1 = \infty$ (см. рис. 3), здесь также наблюдается запаздывание, а форма выключения тока изменяется в зависимости от x . Согласно рис. 4, для идеальной петли и идеального согласования полное время выключения тока в петле равно $T/2$. Очевидно, для реальной петли это время окажется больше.

Эффекты запаздывания, которые для идеальной петли иллюстрирует рис. 4, наблюдаются в эксперименте. На рис. 5, *a* приведены осциллограммы выключения тока в петле размером 100×100 м ($R_{\text{пост}} = 13.25 \cdot 10^{-3}$ Ом/м, $G \approx 10^{-11}$ См/м) в точках с координатами $x = 0, 100$ и 200 м. Измерения выполнены на полигоне Института геофизики и метеорологии Кельнского университета [Helwig, Kozhevnikov, 2003]. Для изучения процесса выключения тока в разрыв петли в точке с координатой x включался шунт, напряжение на котором регистрировалось с помощью цифрового осциллографа с автономным питанием. К зажимам петли был подключен резистор с сопротивлением 490 Ом, обеспечивавший режим, близкий к согласованному.

Для сравнения на рис. 5, *b* воспроизведены приводившиеся выше (см. рис. 4, *b*) графики выключения тока в соответствующих точках периметра идеальной петли. Как можно видеть, в целом между формой экспериментальных и модельных графиков имеет место несомненное сходство. Вместе с тем в деталях наблюдаются отличия. Вследствие частотной дисперсии первичных параметров реальной петли выключение тока в каждой точке ее периметра — за исключением зажимов — растянуто или «сглажено» по сравнению с таковым для идеальной петли. Кроме этого, вблизи зажимов наблюдается кратковременный импульс или «выброс» тока отрицательной полярности.

На рис. 5, *a* наряду с экспериментальными данными показаны результаты расчетов выключения тока в петле на основе ее представления в виде комбинации двух длинных линий. Модельные графики соответствуют «оптимальным» значениям погонной емкости C провода и удельного сопротивления ρ подстилающего полупространства, которые использовались в качестве подгоночных параметров. Поиск «оптимальной» модели осуществлялся путем ручного подбора. В результате были найдены «наилучшие» значения параметров, т.е. такие, при которых модельные графики визуально наиболее близки к измеренным: $\rho \approx 5\text{—}10$ Ом·м, $C = 4.7 \cdot 10^{-11}$ Ф/м.

Причина появления короткого импульса тока в точках, близких к зажимам петли, остается невыясненной. Можно предположить, что он возникает вследствие емкостной связи между близкими к зажи-

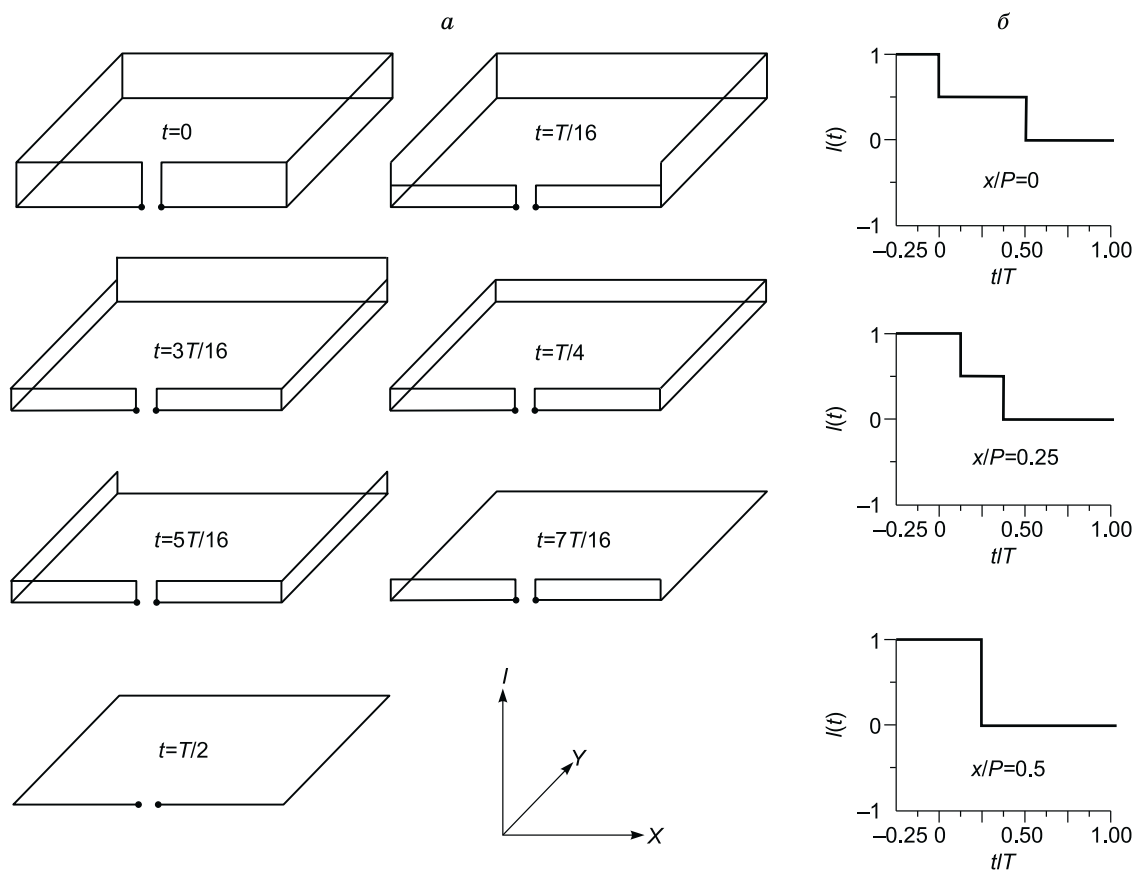


Рис. 4. Выключение тока в идеальной петле, к которой подключен резистор с сопротивлением, равным удвоенному характеристическому сопротивлению линии провод—земля (режим согласования):

a — распределение тока по периметру петли для фиксированных моментов времени; *б* — графики тока в зависимости от времени в некоторых точках периметра петли.

мам петли участками провода и входом регистратора (в рассматриваемом случае цифрового осциллографа с автономным питанием). Подобные эффекты относятся к разряду системных помех; их изучение представляет самостоятельную проблему и выходит за рамки настоящей статьи.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление измеренных и модельных данных представляет интерес не только в качестве иллюстрации того, что модель петли в виде комбинации длинных линий объясняет и/или предсказывает, как выключается ток в петле, но и как повод для дискуссии.

На рис. 6 приведены результаты расчетов, показывающие, как изменяется форма и длительность выключения тока $I_0 = 0.09$ А в центральной ($x = 200$ м) точке периметра петли размером 100×100 м в зависимости от удельного сопротивления подстилающей среды (см. рис. 6, *a*), погонной емкости C провода (см. рис. 6, *б*) и сопротивления резистора R_1 , шунтирующего петлю (см. рис. 6, *в*). Каждый из рисунков иллюстрирует влияние одного параметра, остальные остаются фиксированными.

Рисунки наглядно иллюстрируют, как изменение того или иного параметра влияет на процесс выключения тока в петле и, на первый взгляд, не требуют комментариев. Тем не менее необходимо отметить один момент. Как показывает рис. 6, *в*, при фиксированных удельном сопротивлении подстилающей среды и емкости провода можно подобрать такое сопротивление шунтирующего резистора, что время выключения близко к минимальному.

Однако при раскладке петли в другом месте погонная емкость (зависящая от эффективной высоты провода, особенностей микрорельефа, растительности, влажности) окажется другой [Кожевников, 2009]. Удельное сопротивление земли также будет другим, а значит — при фиксированном сопротивлении шунтирующего резистора ($R_1 = 400$ Ом) изменится и процесс выключения тока, который зависит от сопротивления подстилающей среды (см. рис. 6, *a*) и погонной емкости провода (см. рис. 6, *б*). Таким об-

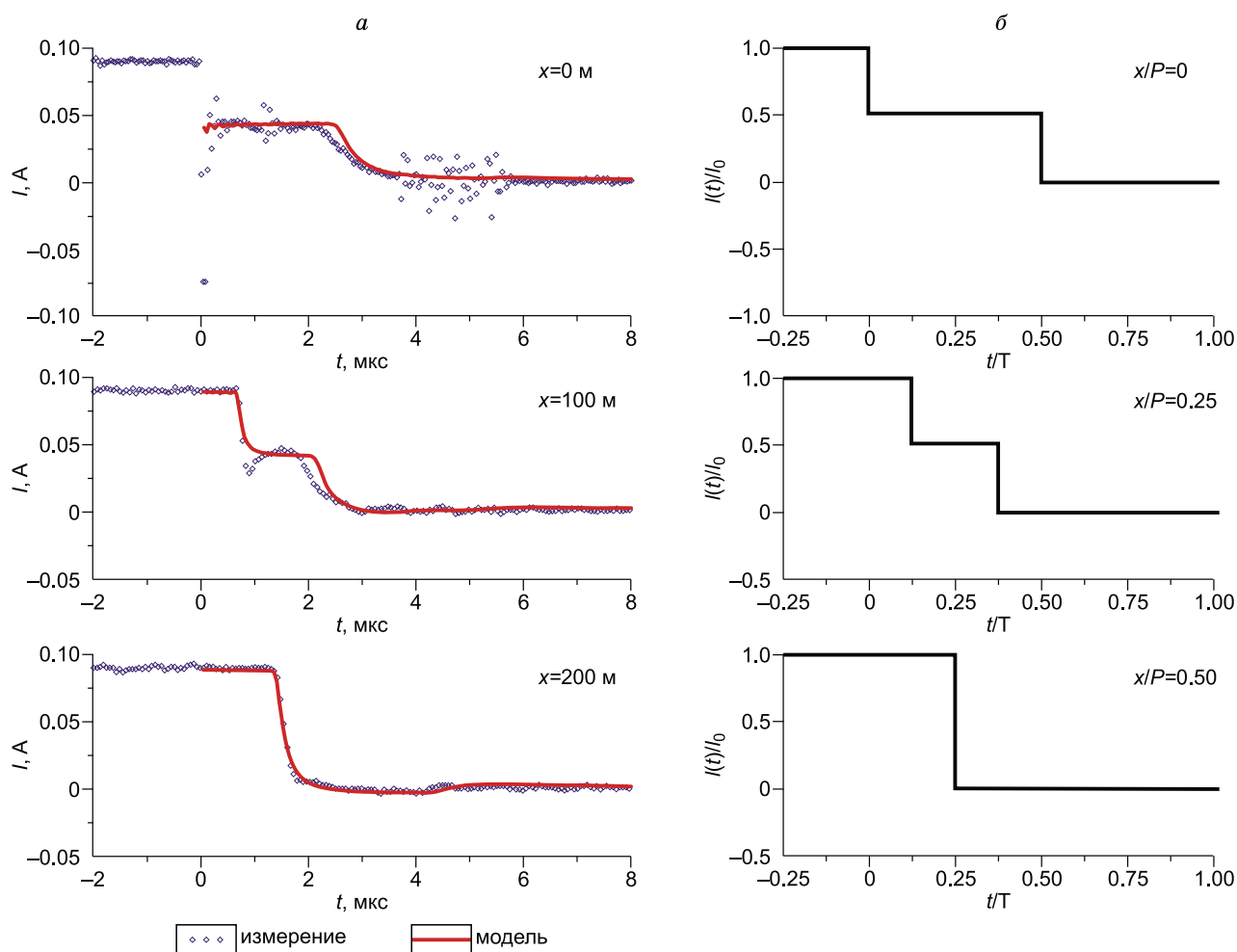


Рис. 5. Выключение тока в режиме согласования:

а — в реальной петле размером $100 \times 100 \text{ м}$ в точках с координатами $x = 0, 100$ и 200 м ; *б* — в идеальной петле.

разом, подобранный на каком-либо пункте зондирования шунтирующий резистор при перемещении в другое место уже не обеспечит согласование и поэтому не будет оптимальным.

Сказанное, разумеется, не означает, что петлю не следует шунтировать. Как показывает практика полевых работ, путем подбора сопротивления шунтирующего резистора можно добиться того, что выключение тока не носит колебательный характер и при этом не является чрезмерно «затянутым» [Ванчугов, Кожевников, 1998]. Однако такой способ применим лишь при условии, что измерение индукционной переходной характеристики начинается не слишком рано. Стремление продвинуться в область как можно более ранних времен наталкивается на принципиальное ограничение. Его суть заключается в том, что на ранних временах параметры петли зависят от геоэлектрического разреза и окружающей обстановки, в частности, метеоусловий [Кожевников, 2011]. Таким образом, в области ранних времен использование такого понятия, как первичное поле источника, теряет смысл. На основе традиционной теории индуктивной электроразведки, когда принимается, что свойства источника первичного поля не зависят от подстилающей среды, подобрать модель среды, объясняющую процесс выключения тока в петле, не представляется возможным. Однако, как показано в настоящей и предшествующих статьях [Кожевников, 2009], такой подбор возможен, если выйти за рамки традиционной теории и рассматривать петлю и подстилающую ее среду как единую систему с распределенными параметрами.

Завершая обсуждение, необходимо отметить, что в данной статье при теоретическом рассмотрении выключения тока было принято, что петля мгновенно отключается от источника, и в дальнейшем выключение тока контролируется только параметрами образующих ее длинных линий и сопротивлением шунтирующего резистора. Как правило, в генераторах импульсов тока, используемых в электроразведочной аппаратуре для метода переходных процессов, для защиты электронных ключей от перенапря-

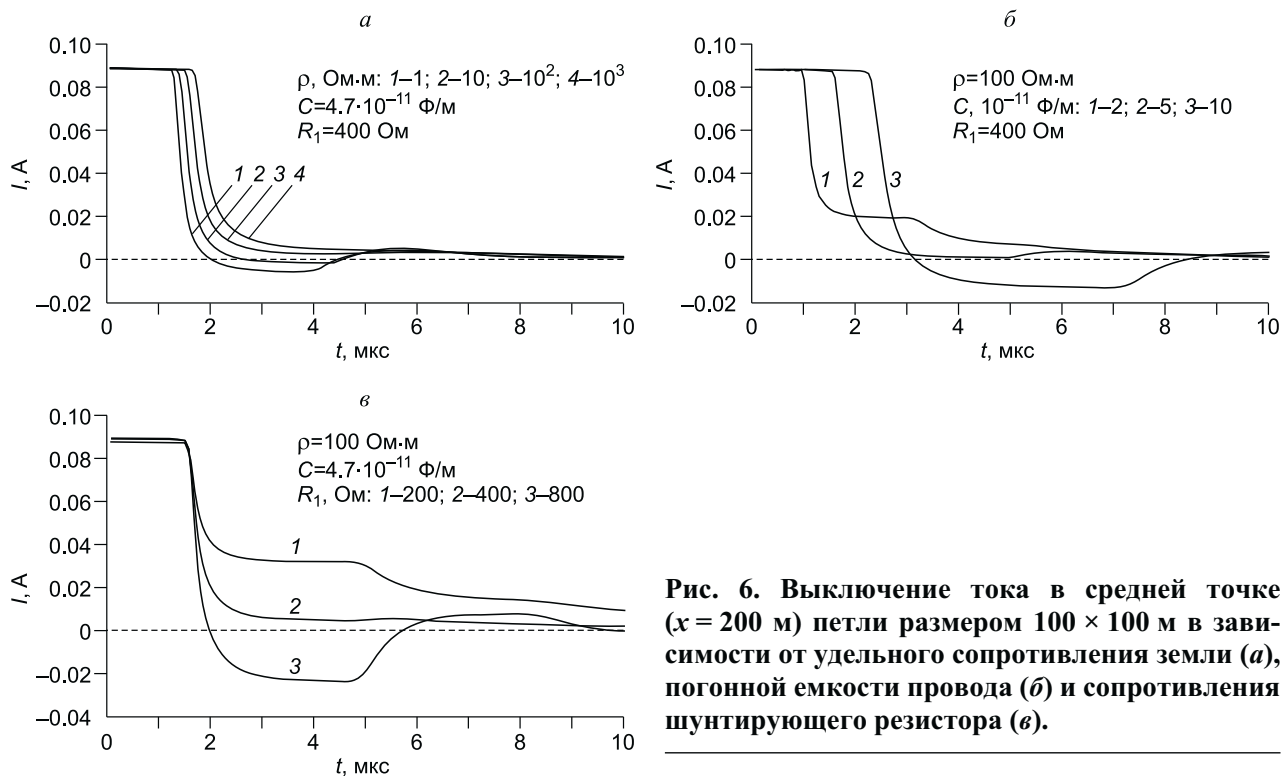


Рис. 6. Выключение тока в средней точке ($x = 200$ м) петли размером 100×100 м в зависимости от удельного сопротивления земли (а), погонной емкости провода (б) и сопротивления шунтирующего резистора (в).

жения параллельно петле подсоединяются включенные навстречу стабилитроны, лавинные диоды или другие элементы, ограничивающие напряжение на нагрузке и, соответственно, ключах. Обычно напряжение ограничения $U_{огр}$ по порядку величины составляет сотни вольт и более (в аппаратуре FastSnap для малоглубинных зондирований методом переходных процессов $U_{огр} = 400$ В: <http://www.sibgeosystems.ru/hardware/FastSnap/>). Если величина тока в петле превышает 1–2 А, при его выключении выбросы напряжения на зажимах петли ограничиваются на уровне $U_{огр}$. С одной стороны, это защищает электронные ключи от пробоя, а с другой, — приводит к затягиванию процесса выключения тока в петле [Отт, 1979], что, в свою очередь, увеличивает начальное время регистрации ЭДС переходного процесса и, соответственно, минимальную глубину зондирований. По этой причине при изучении верхней части разреза измерения стремятся выполнять при малых токах. Цель экспериментов, которые описаны в настоящей статье, заключалась в том, чтобы изучить процесс выключения тока в петле в условиях, когда он контролируется не параметрами электронной схемы, а самой петли и подстилающей ее среды. В описанных экспериментах величина установившегося тока составляла около 0.1 А. Это позволило обойтись без элементов, защищающих электронный ключ от перенапряжений, и воспользоваться для анализа экспериментальных результатов теорией линейных цепей с распределенными параметрами.

ВЫВОДЫ

Петля в совокупности с подстилающей ее ВЧР образует систему с распределенными параметрами. На поздних временах и/или низких частотах для ее описания и анализа целесообразно использовать модель эквивалентного контура с сосредоточенными параметрами.

На временах, сравнимых с периодом свободных колебаний тока, модель петли в виде контура с сосредоточенными параметрами не объясняет экспериментальные данные. Их анализ свидетельствует о том, что в области ранних времен петля может быть представлена в виде симметричной комбинации двух длинных линий, образованных проводом петли и подстилающей его ВЧР. Первичные и, соответственно, вторичные параметры линий зависят от частоты/времени и удельного сопротивления подстилающей среды.

Такое представление петли позволяет, воспользовавшись средствами теории длинных линий, рассчитать ток для любого момента времени в любой точке петли. Задача решается в частотной области, после чего осуществляется трансформация во временную область.

При расчете погонных сопротивлений и индуктивности провода необходимо учитывать: скин-эффект в проводе, взаимодействие каждой линии с собственным током-изображением и взаимную индуктивность между линиями.

Представление петли в виде комбинации двух длинных линий позволяет решить обратную задачу, а именно подобрать параметры линий и сопротивление подстилающей среды, при которых модельные графики выключения тока близки к измеренным.

В настоящей и более ранних статьях [Кожевников, 2009, 2011] влияние подстилающей среды учитывалось на основе модели земли в виде однородного проводящего и/или поляризующегося полупространства. Логично предположить, что привлечение более сложных моделей, например, горизонтально-слоистых, позволит добиться лучшего соответствия модельных и экспериментальных данных.

Поскольку на ранних временах параметры генераторной петли зависят от геоэлектрического разреза, а иногда и от окружающей обстановки, например, метеословий, такое понятие, как «первичное поле источника» применительно к измерениям на ранних временах, теряет смысл. Поэтому инверсия индукционных переходных характеристик в области ранних времен на основе традиционной теории импульсной индуктивной электроразведки не представляется возможной.

Автор признателен А.К. Манштейну и анонимному рецензенту за замечания, которые были учтены при подготовке окончательной версии статьи.

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

ЛИТЕРАТУРА

А.с. № 16995248 СССР. Способ геоэлектроразведки / Г.С. Вахромеев, Н.О. Кожевников, С.П. Никифоров, И.В. Никитин. Оpubл. в Б.И., 1991, № 44.

Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. М., Высшая школа, 1980, 152 с.

Ванчугов В.А., Кожевников Н.О. Методика и результаты применения импульсной индуктивной электроразведки при изучении геоэлектрического строения Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. Вып. 22. Иркутск, 1998, с. 164—176.

Вишняков А.Э., Вишнякова К.А. Возбуждение и измерение полей в электроразведке. Л., Недра, 1974, 129 с.

Джонсон Г., Грэхем М. Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии. Пер. с англ. М., Издательский дом «Вильямс», 2005, 1024 с.

Ефимов Ф.Д. Переходный процесс приемной рамки и его влияние на результаты наблюдений в дипольном варианте МПП // Методы разведочной геофизики. Электроразведка, НПО «Геофизика», 1976, вып. 26, с. 72—79.

Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «ЦИКЛ». Новосибирск, СНИИГГиМС, 1981, 99 с.

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

Кожевников Н.О. Применение теории длинных линий для исследования собственной переходной характеристики незаземленной горизонтальной петли // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (3), с. 300—316.

Кожевников Н.О. Затухающие колебания тока в незаземленной горизонтальной петле и их связь с инфильтрацией грунтовых вод // ДАН, 2011, т. 437, № 6, с. 820—823.

Кожевников Н.О., Плотников А.Е. Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза // Геофизика, 2004, № 6, с. 33—38.

Николаев Ю.В., Сидоров В.А., Ткаченко А.К. Собственные процессы в совмещенных приемно-генераторных контурах при зондированиях становлением поля. М., 1988. Деп. в ВИНТИ 04.04.08, № 2563-В88, 15 с.

Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. М., Мир, 1979, 317 с.

Плотников А.Е. Оценка ограничений метода переходных процессов при исследовании малых глубин: численный эксперимент // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (7), с. 1144—1152.

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

Соколов В.П., Табаровский Л.А., Рабинович Б.И. Преобразование переходных характеристик для импульсов сложной формы // Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике. Новосибирск, ИГГиГ СО РАН, 1978, с. 81—92.

Шалыт Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами. М., Энергоиздат, 1982, 312 с.

Шарлов М.В., Татьков И.Г., Поспеев А.В. Фильтрация паразитного колебательного процесса, осложняющего сигналы ЗСБ, в программе TEM-Processing // I Междунар. конф. по электромагнитным методам исследования «ГЕОБАЙКАЛ_2010». Тез. докл. Иркутск, 2010, 2 с.

Шимони К. Теоретическая электротехника. Пер. с нем. М., Мир, 1964, 774 с.

Asten M.W. Full transmitter waveform transient electromagnetic modeling and inversion for soundings over coal measures // Geophysics, 1987, v. 52, № 3, p. 279—288.

Fitterman D.V., Anderson W.L. Effect of transmitter turn-off time on transient soundings // Geoprospection, 1987, v. 24, p. 131—146.

Helwig S.L., Kozhevnikov N.O. Schwingungen in TEM Sendesignalen zu frühen Zeiten // 20 Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein, 29.09.-3.10.2003, Hrsg., 2003, A. Hördt und J.B. Stoll, S. 11—20.

Kozhevnikov N., Helwig S. Very early time response of an ungrounded horizontal loop: theory and experiment // Extended Abstracts, 22nd EM Induction Workshop, Weimar, Germany, August 24—30, 2014, 4 p.

Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P. Distributed EM parameters of an ungrounded horizontal loop and their relation to the near-surface geoelectrical features: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Chicago, USA, 1998, EEGS, p. 1019—1027.

Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P. Early time TEM response of an ungrounded horizontal loop — a new look: 62nd EAGE Conference, Expanded Abstracts, Glasgow, 2000, D-11.

Qian B. Selection of frequency bandwidth of a TEM receiving system to avoid false anomalies // Geoprospection, 1985, v. 23, p. 519—526.

Raiche A.P. The effect of ramp function turn-off on the TEM response of layered earth // Exploration Geophysics, 1984, v. 15, № 1, p. 37—41.

Schamper Cyril, Esben Auken, Kurt Sørensen. Coil response inversion for very early time modelling of helicopter-borne time-domain electromagnetic data and mapping of near-surface geological layers // Geophys. Prosp., 2014, v. 62, p. 658—674.

Yu Cigong, Zhihong Fu, Huaiqing Zhang, Heng-Ming Tai, Xuegui Zhu. Transient process and optimal design of receiver coil for small-loop transient electromagnetics // Geophys. Prosp., 2014, v. 62, p. 377—384.

Wang Yaw-Juen, Lui Shi-Jie. A review of methods for calculation of frequency-dependent impedance of overhead power transmission lines // Pros. Natl. Sci. Council. ROC (A), 2001, v. 25, № 6, p. 329—338.

*Рекомендована к печати 28 мая 2015 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
21 ноября 2014 г.*