

УДК 550.837

## ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ ТОКА В НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЕТЛЕ И ИХ СВЯЗЬ С ИНФИЛЬТРАЦИЕЙ ГРУНТОВЫХ ВОД

© 2011 г. Н. О. Кожевников

Представлено академиком М.И. Эповым 17.10.2010 г.

Поступило 08.11.2010 г.

Незаземленная горизонтальная петля, используемая для возбуждения индукционных переходных процессов в земле, является одним из основных элементов системы 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 измеряется создаваемое этими токами вторичное магнитное поле.

В теории обычно предполагается, что ток и, соответственно, первичное поле выключаются мгновенно. Однако реальная петля является инерционной, и после отключения от батареи или генератора в ней возникают собственные колебания тока (так называемый “звон”). Период этих высокочастотных колебаний определяет минимальное время, в течение которого может быть выключен ток в петле. Оно ограничивает начальное время измерений и, соответственно, минимальную глубину зондирования [1].

Обычно “звон” в петле рассматривается как помеха, которую стремятся минимизировать путем шунтирования петли резистором [2] либо с помощью специальных методов обработки [3]. С другой стороны, известны попытки использовать “звон” в качестве источника информации о верхней части геологического разреза (ВЧР) [4]. Поэтому изучение колебаний тока в генераторной петле в зависимости от ее геометрии, используемой аппаратуры, ландшафтных и погодных условий, а также геоэлектрических параметров ВЧР представляет значительный интерес для теории и практики импульсной индуктивной электроразведки.

Процесс возникновения в петле собственных колебаний тока рассмотрен в [5, 6]. На основе теории длинных линий предложена модель, с по-

мощью которой удалось объяснить связь периода колебаний и постоянной времени затухания с параметрами провода, размерами петли и удельным электрическим сопротивлением (УЭС) подстилающих пород. Вместе с тем один из полевых экспериментов по изучению колебаний тока в петле обнаружил нюансы, которые не могут быть объяснены в рамках указанной модели.

Измерения выполнены в окрестностях пос. Черноруд в Приольхонье (Западное Прибайкалье). Мощность рыхлых отложений, которые образованы разрушенными коренными породами, вынесенными временными потоками, составляет 10–20 м. Заполнителем служат мелкий и пылеватый песок, а также супесь. Ниже залегают мраморы, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты. По данным методов ВЭЗ и ЗСБ рыхлые отложения и породы основания слабо различаются по удельному электрическому сопротивлению. В первом приближении геоэлектрический разрез является однородным полупространством с сопротивлением порядка первых сотен Ом·м.

В приустьевой части пади Барун-Хал была разложена квадратная петля размером 200 × 200 м из провода ГПМП. Колебания тока в петле возбуждали с помощью последовательно включенных батареи и электронного ключа, который периодически подключал и отключал источник тока от зажимов петли [6]. Для измерения колебаний тока использовали шунт, включенный в разрыв провода в средней точке периметра петли. Измерительным прибором служил электронный осциллограф с автономным питанием. Наблюдения проводили в течение трех недель, при этом положение петли оставалось неизменным.

По истечении первых микросекунд после отключения петли от источника колебания тока в некоторой точке провода генераторной петли описываются выражением

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau_0} \cos(\omega_0 t),$$

$I(t)$  — ток в момент времени  $t$  после отключения петли от батареи,  $I_0$  — ток в момент отключения петли от источника ( $t = 0$ ),  $\omega_0$  — круговая частота

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск*

собственных колебаний, рад/с;  $\tau_0$  – постоянная времени затухания, с.

По колебаниям переходных характеристик тока определяли период собственных колебаний  $T_0 = 2\pi/\omega_0$  и постоянную времени затухания  $\tau_0$ . По окончании эксперимента выяснилось, что параметры колебательного процесса, измеренные в разные дни, неодинаковы. Более того, оказалось, что изменения  $T_0$  и  $\tau_0$  не являются случайными. Это хорошо видно на рис. 1, где результат каждого отдельного измерения представлен точкой в плоскости  $(T_0, \tau_0)$ . Представленные таким образом данные образуют три совокупности, центры которых отмечены крестиками с номерами: 1 – измерения, полученные во время установившейся сухой погоды, 2 – во время дождя. В третью совокупность группируются данные, измеренные на следующий день после дождя.

Попытаемся дать интерпретацию приведенным на рис. 1 результатам в рамках модели, основанной на представлении петли в виде двух идентичных длинных линий [6]. Напомним, что при описании системы петля – ВЧР на основе теории длинных линий определяющую роль играют так называемые первичные параметры, т.е. приходящиеся на единицу длины провода (погонные) электрическое сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , емкость  $C$  и проводимость изоляции  $G$ .

Период собственных колебаний тока в петле определяется её периметром  $P$  и погонными индуктивностью и емкостью [5]

$$T_0 = 2P\sqrt{LC}. \quad (1)$$

Погонная индуктивность зависит от УЭС подстилающего полупространства, однако эта зависимость слабая, поэтому на период колебаний тока сопротивление среды оказывает незначительное влияние [6]. В отличие от индуктивности активное сопротивление заметно изменяется в зависимости от УЭС подстилающего полупространства. Потому постоянная времени затухания, которую можно оценить по формуле

$$\tau_0 = \frac{2L}{R}, \quad (2)$$

является параметром, информативным по отношению к удельному электрическому сопротивлению ВЧР [4].

Переход от совокупности 1 к 2 понятен: вследствие уменьшения эффективной высоты расположения провода над землей (трава, камни и т.п. намочки), благодаря чему “земля” оказалась ближе к проводу. Из-за того что предметы, окружающие провод, покрыты водяной пленкой, возрастает эффективная диэлектрическая проницаемость провода. Это приводит к возрастанию его погонной емкости и, следовательно, периода  $T_0$  (1).

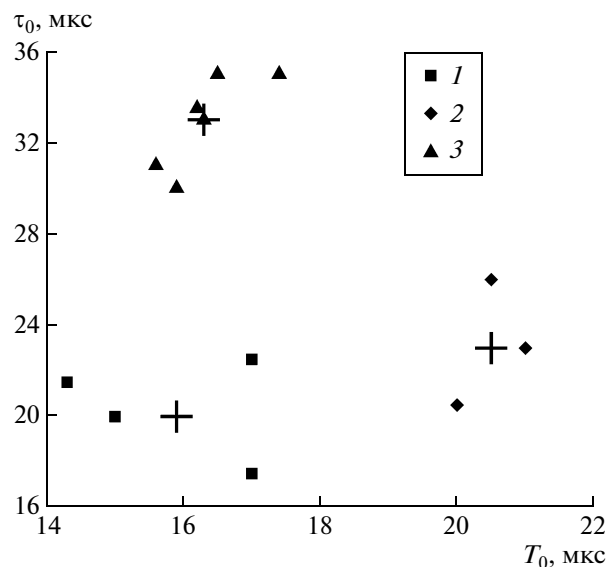
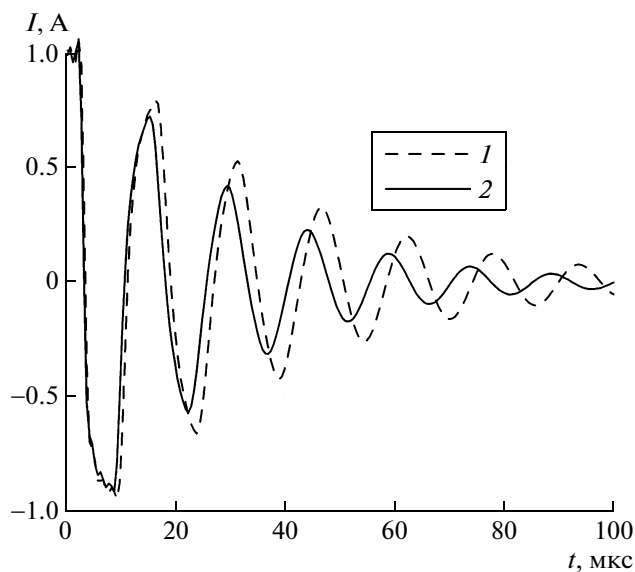


Рис. 1. Период  $T_0$  и постоянная времени затухания  $\tau_0$  колебаний тока в горизонтальной незаземленной петле размером  $200 \times 200$  м, измеренные при установившейся сухой погоде (1); во время дождя (2) и через сутки после дождя (3). Крестиками показаны средние значения  $T_0$  и  $\tau_0$  по соответствующим совокупностям.

Труднее объяснить результаты измерений, объясняющие третью совокупность. Согласно (2) рост  $\tau_0$  может быть обусловлен увеличением  $L$ , уменьшением  $R$  или действием обоих факторов. Однако поскольку по сравнению с данными группы 1 период  $T_0$  изменился незначительно, а погонная индуктивность слабо зависит от УЭС среды (именно поэтому на другой день после дождя период колебаний возвращается к измеренному в сухую погоду), вероятная причина увеличения  $\tau_0$  заключается в снижении вносимого в петлю активного сопротивления.

В этой связи логично предположить, что после дождя вода проникает на все большую глубину, заполняя поры в рыхлых осадках, вследствие чего понижается удельное электрическое сопротивление ВЧР. Однако оценки, выполненные на основе представления петли в виде двух идентичных длинных линий, показывают, что предсказанные значения  $\tau_0$  в 1.2–1.5 раза меньше измеренных. Более того, если сопротивление среды, подстилающей петлю, не превышает нескольких сотен Ом · м, его изменения практически не влияют на  $\tau_0$ , тогда как эксперимент со всей определенностью свидетельствует об увеличении этого параметра в полтора раза (рис. 1).

Объяснение этого несоответствия содержится в статье [7], где описаны результаты применения спектрального метода ВП для изучения фильтрации воды в суглинках. Измерения были выполне-



**Рис. 2.** Колебания тока в незаземленной горизонтальной петле размером  $200 \times 200$  м, рассчитанные на основе представления петли и подстилающей ее среды в виде двух идентичных длинных линий [6]. Если петля подстилается неполяризуемым ( $\eta = 0$ , кривая 1) полупространством, колебания тока затухают в полтора раза медленнее по сравнению с тем случаем, когда  $\eta = 0.9$  (кривая 2).

ны в полевых и лабораторных условиях. В обоих случаях с помощью специальной установки создавался искусственный дождь, во время и после которого на разных частотах измерялись амплитуда и фаза комплексного удельного сопротивления грунта. При изучении изначально сухого грунта через некоторое время после начала дождя на высоких (1 кГц и более) частотах отмечалось резкое изменение фазы, причем в лабораторных условиях эффект сохранялся в течение длительного времени после прекращения дождя. При орошении водонасыщенного грунта этот эффект не наблюдался. Авторы цитируемой работы связали изменение фазы с уменьшением поляризуемости грунта при водонасыщении. Этот вывод представляется разумным, поскольку в момент резкого изменения фазового угла мнимая составляющая удельной электропроводности уменьшается в несколько раз и остается на этом уровне в течение длительного времени после прекращения дождя.

По мнению авторов [7] тот факт, что поляризуемость сухого грунта выше, чем водонасыщенного, объясняется проявлением эффекта Максвелла–Вагнера. Сухой грунт образован минеральными агрегатами, каждый из которых обладает поверхностной проводимостью и способен поляризоваться под действием приложенного электрического поля. При пористости в первые десятки процентов агрегаты находятся в непроводящей матрице, об-

разованной структурными порами размером 30–75 мкм. При насыщении структурных пор водой матрица становится проводящей, а часть ионов, образующих оболочки агрегатов в виде связанной минерализованной воды, переходит в раствор, и эти ионы становятся более свободными, что сопровождается уменьшением мнимой составляющей электропроводности и, соответственно, поляризуемости и фазового угла при измерении эффектов ВП в частотной области [7, 8].

Результаты, описанные в [7], инициировали попытки автора смоделировать эффект, проявляющийся как уменьшение скорости затухания колебаний тока в незаземленной петле после дождя на основе модели среды в виде однородного проводящего и поляризуемого полупространства. Расчет колебаний тока выполнен способом, подробно описанным в [6]. При этом в выражение для комплексного сопротивления, вносимого в петлю за счет влияния подстилающей среды, подставлялась комплексная, зависящая от частоты удельная электропроводность, описываемая формулой Коул–Коул [9]:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^c},$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – круговая частота, рад/с;  $\sigma_0$  – удельная электропроводность на постоянном токе, См/м;  $\eta$  – поляризуемость;  $c$  – показатель степени;  $\tau$  – время релаксации, с.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов для петли  $200 \times 200$  м, расположенной на поверхности однородного полупространства с удельным сопротивлением 500 Ом·м. Сплошной линией показаны колебания тока в средней точке периметра петли для поляризуемого ( $\eta = 0.9$ ,  $\tau = 100$  мкс,  $c = 0.8$ ), штриховой – неполяризуемого ( $\eta = 0$ ) полупространств. Как нетрудно видеть, переход полупространства из поляризуемого в неполяризуемое состояние сопровождается уменьшением скорости затухания собственных колебаний:  $\tau_0$  увеличивается от 24 до 33 мкс.

На первый взгляд, поляризуемость  $\eta = 0.9$  может показаться слишком высокой. Однако с учетом того, что эффективная относительная диэлектрическая проницаемость минеральных агрегатов, образованных глинистыми частицами, на частоте 150 Гц оценивается величиной порядка  $10^8$ , а на частоте 1.5 кГц –  $10^4$  [7], значение  $\eta = 0.9$  не должно вызывать удивления.

С другой стороны, модель геологической среды в виде однородного поляризуемого полупространства может рассматриваться лишь в качестве основы для оценки порядка величины наблюдаемых эффектов. Скорее всего мощность верхнего слоя, параметры которого изменяются под влиянием инфильтрации поверхностных вод,

не превышает первых метров. Возможно, поляризующегося слоя с такой мощностью достаточно, чтобы при его водонасыщении затухание колебаний тока в системе провод петли – ВЧР уменьшилось заметным образом.

Представленные в статье экспериментальные результаты изучения колебаний тока в незаземленной петле, как и эффекты, обсуждаемые в работе [7], дают основания предполагать, что при насыщении сухих дисперсных грунтов водой их поляризуемость резко уменьшается. В настоящий момент механизм, объясняющий это явление, остается предметом дискуссий, а модель для описания системы провод петли – ВЧР требует дальнейшей разработки с учетом поляризуемости ВЧР. Вместе с тем эти результаты свидетельствуют о возможности использования колебания тока в незаземленной петле для изучения влагопереноса в дисперсных грунтах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кожевников Н.О., Плотников А.Е.* // Геофизика. 2004. Т. 6. С. 33–38.
2. *Вишняков А.Э., Вишнякова К.А.* Возбуждение и измерение полей в электроразведке. Л.: Недра, 1974.
3. *Шарлов М.В., Татьков И.Г., Поспеев А.В.* В сб.: I Междунар. конф. по электромагнитным методам исследования “ГЕОБАЙКАЛ-2010”. Тез. докл. Иркутск, 2010. 2 с.
4. *Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О., Никифоров С.П., Никитин И.В.* Способ геоэлектроразведки. А.с. № 16995248 СССР // Бюл. Изобр. 1991. № 44.
5. *Кожевников Н.О.* // Геофизика. 2006. № 1. С. 29–39.
6. *Кожевников Н.О.* // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 300 – 316.
7. *Ghorbani A., Cosenza Ph., Ruy S., et al.* // Water Resource. Res. 2008. V. 44. W08402.
8. *Ghorbani A., Cosenza Ph., Revil A., et al.* // Appl. Clay Sci. 2009. V. 43. P. 493–502.
9. *Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., et al.* // Geophysics. 1978. V. 43. P. 588–609.