

## ОЦЕНКА ОГРАНИЧЕНИЙ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МАЛЫХ ГЛУБИН: ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

**А.Е. Плотников**

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

На основе предложенной электрической модели установки для зондирования недр индуктивным методом переходных процессов проведен численный эксперимент по оценке ограничений метода при исследовании малых глубин. В ходе эксперимента сопоставляются теоретические и псевдоэкспериментальные кривые ЭДС. По их сходимости определяется способность установки адекватно принимать отклик от возбужденного пространства на глубине. По результатам эксперимента построены графики зависимости измерительных параметров установки от ее геометрических размеров. Даны рекомендации по использованию малоразмерных установок.

*Метод переходных процессов, малая глубина, модель эксперимента, помеха.*

## EVALUATION OF LIMITATIONS OF THE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD IN SHALLOW-DEPTH STUDIES: NUMERICAL EXPERIMENT

**A.E. Plotnikov**

Based on the proposed electrical model of a system for subsurface sensing by an induction transient electromagnetic method, a numerical experiment was performed to evaluate the limitations of the method in shallow-depth studies. During the experiment, the theoretical and pseudoexperimental emf curves are compared. Based on the degree of their convergence, the capability of the system to adequately record the response from the excited space at depth is determined. The experimental results are used to plot dependences of the measured parameters of the system on its geometrical dimensions. Recommendations on the use of small-size systems are given.

*Transient electromagnetic method, shallow depth, model experiment, interference*

---

### ВВЕДЕНИЕ

В статье [Кожевников, Плотников, 2004] были показаны ограничения метода при изучении строения недр на малых глубинах. В работе использовались аналитические методы, а выводы иллюстрировались соответствующими графиками.

В настоящей работе исследование ограничений выполняется с помощью численного эксперимента на обучающих программах путем расчета кривых отклика с наложенными на них помехами. Возможности метода переходных процессов на малых глубинах определяются по результатам сопоставления теоретических и псевдоэкспериментальных кривых электродвижущей силы (ЭДС). Подобный подход позволяет раскрыть новые детали в оценке ограничений и является более наглядным.

Для конкретной геофизической установки понятие малая глубина означает потерю возможности адекватно отражать на зарегистрированной с ее помощью кривой отклика реальной неоднородности в геоэлектрическом разрезе. Когда такое происходит, а необходимость в информации о данной области пространства остается, обычно переходят к установке меньшего размера. При этом значительно уменьшается величина полезного сигнала на фоне шумов сопутствующих вредных переходных процессов. Если проделать несколько таких переходов, то понятие «малая глубина» начинает ассоциироваться с невозможностью извлечения полезной информации из зарегистрированных сигналов в силу превалирования помех. В этом случае возникает вопрос о целесообразности использования малоразмерных установок. Отсюда вытекает задача настоящего численного эксперимента — оценка ограничений метода на малых глубинах.

Как известно, регистрируемый сигнал при зондировании геологической среды средствами импульсной индуктивной электроразведки представляет свертку полезного отклика от изучаемого пространства с различными сопутствующими измерению помехами, не несущими в себе информации о строении недр. Поскольку на практике полностью освободиться от сопутствующих искажений не удается, для их анализа проводят многочисленные натурные эксперименты, позволяющие подчеркнуть

одну из составляющих принимаемого сигнала и ослабить другие. Численный эксперимент обеспечивает решение данной задачи без участия аппаратуры, только с учетом ее основных параметров. Дополнительные возможности у выбранного подхода появляются еще и потому, что он позволяет разделить получаемый сигнал на составляющие и анализировать их роль в искажении полезного отклика независимо друг от друга.

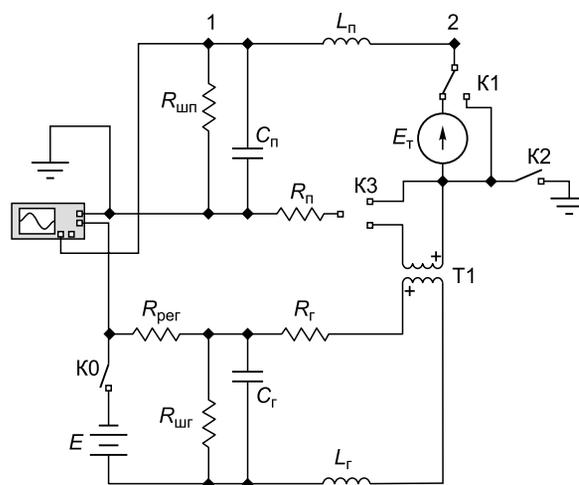
## СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИГНАЛА И МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для того чтобы получить информацию о разрезе, землю возбуждают импульсами тока в генераторной петле, расположенной на поверхности. В момент выключения тока (согласно закону электромагнитной индукции) в проводящей земле формируются вихревые токи, которые, распространяясь в глубь среды, создают свое изменяющееся электромагнитное поле. Этот процесс называют становлением поля. На поверхности земли располагается приемная петля, в которой наводится ЭДС индукции электромагнитного поля устанавливающихся в земле вихревых токов. Наведенная ЭДС в виде переходного сигнала, несущего полезную информацию, называется откликом, а его величина рассчитывается по известным формулам, например [Кожевников, Антонов, 2007]. Обычно при анализе системы импульсной индуктивной электроразведки ее компоненты рассматривают как последовательность линейных четырехполюсников с сосредоточенными параметрами [Захаркин, 1981]. Полагают также, что параметры четырехполюсников взаимно независимы и постоянны во времени.

По другой методике [Кожевников, 2006], генераторная и приемная петли в совокупности с подстилающей их верхней частью геологического разреза образуют систему с распределенными параметрами, компоненты которой взаимодействуют друг с другом. Подчеркивается, что именно верхняя часть геологической среды объединяет элементы установки в единую систему с качествами, не сводимыми к простой сумме качеств отдельных элементов. В работе Н.О. Кожевникова [2012] справедливо отмечено, что известные на сегодня критерии подобия, связывающие данные лабораторных и полевых наблюдений, не учитывают специфику генераторно-приемной установки как сложной системы с распределенными параметрами. Указанная проблема является пробелом в теории подобия электромагнитных систем, требующим своего решения.

В силу перечисленных причин в численном эксперименте было принято моделировать генераторную и приемную петли в виде эквивалентных контуров с сосредоточенными параметрами, а электромагнитную связь между ними осуществлять через трансформатор, служащий для преобразования величин токов и напряжений. В простом случае трансформатор состоит из двух гальванически не связанных и неподвижных катушек без ферромагнитного сердечника. Такой трансформатор является линейным элементом, поскольку описывается линейными уравнениями, имеет линейные характеристики и называется воздушным. По существу, именно такой трансформатор образует на поверхности земли система из генераторной и приемной петель во время зондирования методом переходных процессов. Принятое решение, в первом приближении, позволяет учитывать инерционные свойства петель и одновременно моделировать значительные импульсные перенапряжения, возникающие в приемной петле в результате прерывания тока в генераторной петле. Этот процесс, называемый прямой наводкой, на самом деле является более сложным, так как имеет зависимость от геологического разреза [Кожевников, 2012]. Тем не менее предлагаемая эквивалентная электрическая схема (рис. 1) позволяет в лабораторных условиях моделировать основные связи, присутствующие в реальной геофизической установке, и дает представление о происходящих в ней процессах.

Необходимо отметить, что зондирование земли геофизической установкой проводится на малом и большом токах возбуждения. При этом ток в цепи генераторной петли падает по-разному. Это объясняется тем, что переключающие элементы электрической схемы коммутатора, работающего с индуктивной цепью, защищены разработчиками от перенапряжения



**Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема генераторно-приемной установки для нестационарного электромагнитного зондирования.**

$R_r, R_{шр}, L_r, C_r$  — элементы генераторной петли;  $R_n, R_{шн}, L_n, C_n$  — элементы приемной петли; T1 — воздушный трансформатор;  $E_T$  — теоретический сигнал отклика земли; K0—K3 — переключатели режимов измерения; 1, 2 — точки измерения сигналов.

ний специальными узлами. Как правило, эти части схемы вступают в работу с определенного среднего уровня коммутируемого тока. Режим измерения на малом токе в нашем случае является основным, так как максимально отвечает за верхнюю часть изучаемого разреза земли. Процесс выключения малого тока происходит в свободном режиме с постоянной времени  $\tau = L_r / (R_r + R_{ш})$ , что отражает предложенная эквивалентная схема.

Известно, что при расчете цепей с трансформатором используются схемы замещения, при переходе к которым действительные трансформаторные связи (электромагнитные) заменяются электрическими. Эти схемы удобны для аналитического исследования установившегося и переходного режимов в трансформаторе. Схемы составляются таким образом, чтобы их токи и напряжения описывались теми же уравнениями, что и в реальном трансформаторе, и это делает возможным их использование в различных программах. Одну из них, систему «Electronics Workbench» [Чернышов, Чернышова, 2005], предназначенную для моделирования и анализа электрических схем, было решено использовать в данном численном эксперименте.

Как следует из вышеприведенных рассуждений, регистрируемый на выходе приемника сигнал есть результат как минимум трех воздействий. Это переходная характеристика от возбужденной земли, прямая наводка от выключаемого тока в генераторной петле и искажение сигнала инерционными свойствами приемной петли. Представленная эквивалентная схема позволяет анализировать вклад каждого из них, в зависимости от меняющихся параметров геофизической установки и исследуемого разреза земли в рамках указанных упрощений.

Схема состоит из двух частей с линейными элементами  $R$ ,  $L$  и  $C$ , отображающими генераторную и приемную петли. Воздушный трансформатор Т1 моделирует связь между ними, которая контролируется через параметр взаимной индукции. Параметры всех элементов рассчитываются с учетом размеров петель и используемого провода. В схеме присутствуют шунтирующие сопротивления петель  $R_{ш}$ , подбираемые таким образом, чтобы петли работали в режиме, близком к критическому. Все расчеты в эксперименте проводятся при токе возбуждения 1 А, устанавливаемого величиной напряжения батареи  $E$  и регулировочным резистором  $R_{рег}$ . Теоретический сигнал — неискаженный сигнал отклика возбужденной земли — рассчитывается с помощью программы «Unv\_QQ» (автор Е.Ю. Антонов, ИНГГ СО РАН) [Кожевников, Антонов, 2007] и реализуется в схеме через генератор напряжения  $E_r$ . На схеме, приведенной на рис. 1, указаны точки подключения входа программного осциллографа и переключатели, с помощью которых регистрируются необходимые данные.

### УСЛОВИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Обозначение установок соответствует размеру стороны генераторных петель. Для численного эксперимента были взяты данные соосных геофизических установок с одинаковым соотношением между сторонами генераторной и приемной петель ( $L_r/L_n = 2$ ) размером 2000, 200, 20 и 2 м. Первые две встречаются на практике. Две последние установки включены в эксперимент, чтобы проверить возможность использования индуктивной электроразведки в исследованиях малых глубин.

В качестве модели было взято однородное проводящее полупространство с удельным сопротивлением 1, 10, 100 и 1000 Ом·м.

Применимость метода переходных процессов в геоэлектрических исследованиях малых глубин определялась расчетом для выбранной модели среды и геофизической установки теоретического сигнала ЭДС —  $E_r(t)$  и псевдоэкспериментального сигнала ЭДС —  $E_s(t)$ . По относительному расхождению полученных значений сигналов, рассчитанному по формуле

$$\delta(t) = 100 \cdot \frac{E_s(t) - E_r(t)}{E_s(t)} \%, \quad (1)$$

определялась временная точка  $t_1$ , начиная с которой расхождение кривых не выходило за рамки условно принятых 10 %.

Как известно, ограничение длительности регистрации сигнала отклика находится в зависимости от отношения величины принимаемого сигнала к уровню регистрируемых шумов, определяющихся свойствами измерительной системы и внешними помехами. Этот параметр является важным для качественного измерения и регулируется размерами установки и величиной тока в генераторной петле. Возможности современных аппаратных комплексов для зондирования методом переходных процессов таковы, что в благоприятных условиях позволяют выделить сигнал до уровня 100—10 нВ. В данной работе сигналы свободны от шума, хотя это можно было сделать достаточно просто добавлением в электрическую схему генератора случайных сигналов. Поэтому отслеживание временной границы  $t_2$ , до которой имеет смысл проводить регистрацию переходной характеристики, было условно принято вести по достижению сигналом уровня 1 мкВ. Отметка зафиксирована для того, чтобы была возможность отсле-

**Рис. 2. Теоретические ( $E_T$ ) и псевдоэкспериментальные сигналы ЭДС ( $E_3$ ) разных разрезов, рассчитанные для установки 200 м.**

живать ее перемещение в результате изменения параметров установки, и не всегда означает, что сигнал после нее не несет в себе информацию о среде.

### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Пример рассчитанных теоретических и псевдоэкспериментальных кривых ЭДС для установки с генераторной петлей  $200 \times 200$  м и приемной петлей  $100 \times 100$  м при удельном сопротивлении среды от 1 до 1000 Ом·м приведен на рис. 2.

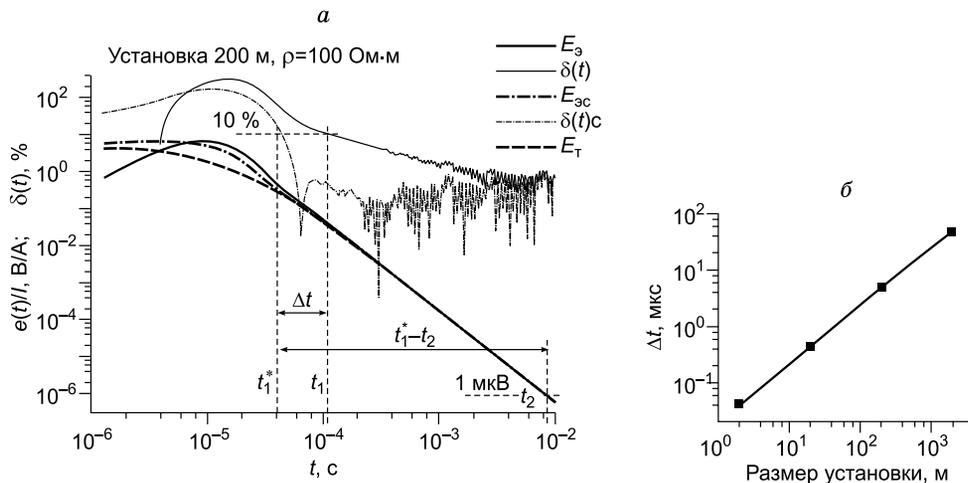
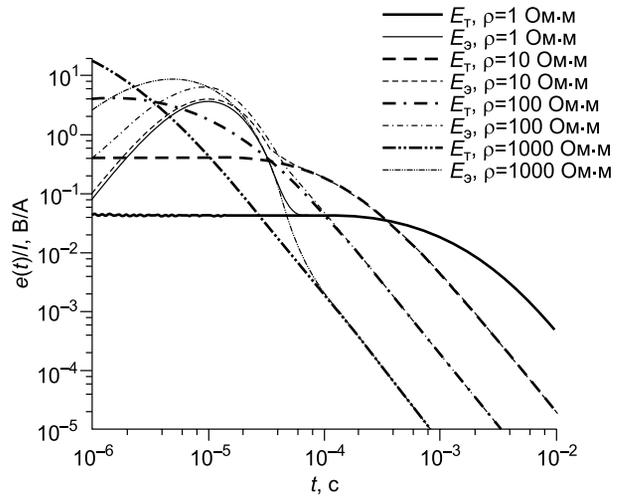
Последовательность действий следующая.

Согласно выбранной установке, в экспериментальную схему (см. рис. 1) заносятся соответствующие значения эквивалентных параметров генераторной и приемной петель и воздушного трансформатора Т1. Для выбранной модели полупространства с помощью программы «Unv\_QQ» рассчитывается теоретическая кривая отклика  $e_T(t)/I$ . Эта функция подставляется в источник ЭДС  $E_T$ . В точке 1 программным осциллографом регистрируется псевдоэкспериментальная кривая ЭДС. Началом для процесса измерения служит момент размыкания ключа К0.

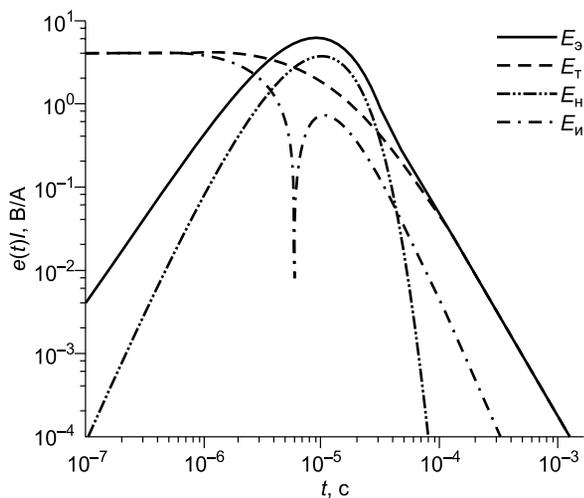
Через воздушный трансформатор Т1 выключающийся ток генераторной петли создает ЭДС в приемной петле, что служит имитацией прямой наводки без учета влияния подстилающего разреза. Одновременно в цепи приемной петли действует ЭДС теоретического сигнала  $E_T(t)$ . Сигнал ЭДС, регистрируемый в точке 1, является сверткой обоих сигналов, искаженной инерционными свойствами приемной петли. Подобным образом рассчитываются псевдоэкспериментальные сигналы ЭДС для всех разрезов.

На рис. 2 видно различие псевдоэкспериментальных сигналов ЭДС от теоретических сигналов. Очевидно, что до определенного момента времени от начала регистрации нет смысла в их интерпретации. Поэтому одной из задач численного эксперимента был расчет этих значений  $t_1$ , чтобы по их величине определять возможность работы установок на малой глубине.

Известно, что инерционность измерительного тракта вносит искажение в регистрируемый сигнал в виде задержки по времени [Захаркин, 1981]. Сдвиг экспериментального сигнала на определенную величину позволяет частично восстановить сигнал отклика и отодвинуть в ранние времена границу сходимости теоретической и экспериментальной кривых. В эксперименте величина сдвига  $\Delta t$  легко определяется по постепенному надвиганию практической кривой на теоретическую кривую и расчетом относительного расхождения кривых по формуле (1). При оптимальном сдвиге форма кривой расхождения приобретает характерный горизонтальный вид на большей своей части, а точка максимально допус-



**Рис. 3. Пример определения сдвига сигнала по времени  $\Delta t$  и границ доверия  $t_1$  и  $t_2$  (а) и кривая зависимости величины сдвига от размера установки (б).**



**Рис. 4. Составляющие измеряемого сигнала.**

Установка 200 м,  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

тимого несоответствия  $t_1$  перемещается влево по шкале времени (рис. 3). В ходе эксперимента было подтверждено, что величину сдвига определяют параметры петель, и что для конкретной установки он одинаковый для всех разрезов. Поскольку сдвиг является восстанавливаемым искажением сигнала, то коррекция сдвига совершалась каждый раз перед сравнением кривых теоретического и экспериментального сигналов.

На рис. 3 выделен участок  $[t_1, t_2]$  скорректированной по времени псевдоэкспериментальной кривой, характеризующийся тем, что на начальных вре-

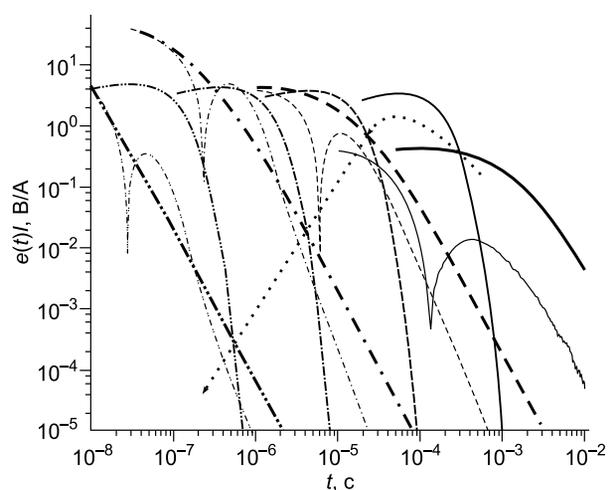
менах его различие с теоретической кривой не превышает 10 %, в средней части максимально схож с ней, а на отметке времени  $t_2$  теряет свои информационные свойства из-за возможного преобладания шумов.

На рис. 4 в качестве примера показан псевдоэкспериментальный сигнал и его составляющие части, полученные в результате численного эксперимента на установке 200 м. Теоретический сигнал рассчитывался с помощью программы «Unv\_QQ». Теоретический сигнал, искаженный только инерционностью приемной петли, регистрировался в точке 1 с переключением ключа К3. Искажение, соответствующее инерционной составляющей приемной петли, получалось вычитанием из последней кривой теоретического сигнала. Сигнал прямой наводки регистрировался в точке 1 с переключением ключа К1. Сложение составляющих сигнала, как и положено, образует псевдоэкспериментальный сигнал, который целиком регистрируется в точке 1, а разделение на составляющие дает возможность оценивать вклад каждой из них.

Как известно, для достоверного отслеживания динамики регистрируемого сигнала на начальном этапе и тем самым сокращения минимальной глубины зондирования уменьшают размеры установки. Это оправдано тем, что меньшая по размерам петля обладает и меньшей инерционностью, которая в первом приближении обратно пропорциональна линейному размеру петли.

Вместе с полезным сигналом отклика петля принимает на себя и прямую наводку от выключения тока в генераторной петле. Оба сигнала в разной степени зависят от геометрических размеров установки. Например, пропорциональное уменьшение линейных размеров установки в  $k$  раз повышает быстроедействие генераторной и приемной петель примерно в  $k$  раз и одновременно приводит к пропорциональному уменьшению коэффициента взаимной индукции. В результате суммарного воздействия указанных факторов общее изменение сигнала прямой наводки на графике с билогарифмической шкалой выглядит как смещение влево по шкале времени без изменения амплитуды и формы. Это говорит об ускорении процесса его нарастания и спада. Подобное происходит и с полезным сигналом отклика.

Анализ данных на рис. 5 позволяет сделать вывод, что при уменьшении установки на три порядка сигнал прямой наводки сжимается/ускоряется на столько же, а полезный сигнал отклика на пять порядков. Одновременно, согласно графикам на рисунке, это приводит к уменьшению полезного сигнала



- |       |                     |           |                   |
|-------|---------------------|-----------|-------------------|
| —     | $E_T$ , уст. 2000 м | · · · · · | $E_T$ , уст. 20 м |
| —     | $E_H$ , »           | · · · · · | $E_H$ , »         |
| —     | $E_M$ , »           | · · · · · | $E_M$ , »         |
| - - - | $E_T$ , уст. 200 м  | · · · · · | $E_T$ , уст. 2 м  |
| - - - | $E_H$ , »           | · · · · · | $E_H$ , »         |
| - - - | $E_M$ , »           | · · · · · | $E_M$ , »         |

**Рис. 5. Графики теоретических сигналов, прямой наводки и инерционной помехи установок разного размера для разреза с удельным сопротивлением  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .**

ла на одной и той же отметке времени на двенадцать порядков. Другими словами: уменьшение размера установки с целью более ранней регистрации сигнала в точке  $t_1$  приводит к значительному повышению требований к параметрам измерительной части оборудования. Так, в силу ускорения процесса становления поля необходимо уменьшать дискретизацию времени, а из-за снижения уровня сигнала повышать разрешающую способность, и не в разы, а на порядки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты численного эксперимента отражены на рис. 6—10 в виде графических данных. Из рис. 6, *a* следует, что изменение размеров установки позволяет пропорционально уменьшить начальное время качественной регистрации сигнала  $t_1$  и в  $\sqrt{t_1}$  раз уменьшить минимальную глубину зондирования [Кожевников, Плотников, 2004]. При этом уменьшение размеров установки на порядок приводит к уменьшению на полтора порядка длительности качественного измерения сигнала отклика ( $t_2$ ) (см. рис. 6, *b*).

Регистрация сигнала на ранних временах сопряжена с определенными трудностями. Оценка параметров установки для получения верных измерений на ранних временах процесса представлена на рис. 7. Кривая  $t_1$  на нем показывает, с какого времени следует ожидать качественного результата измерения для выбранного размера установки. График  $E_n/E_3$  показывает долю инерционной помехи в скорректированном по времени сигнале, зарегистрированном в точке  $t_1$ . Кривая  $E_n$  определяет начальный уровень измеряемого сигнала, а кривая  $t_2$  — минимальную длительность измерения.

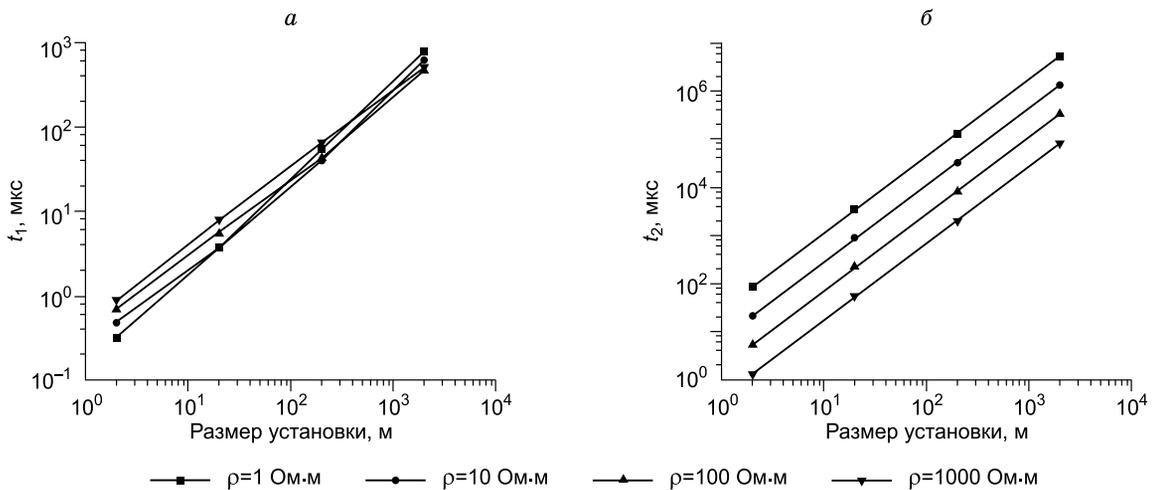


Рис. 6. Зависимость параметров  $t_1$  (*a*) и  $t_2$  (*b*) от размера установки и удельного сопротивления среды.

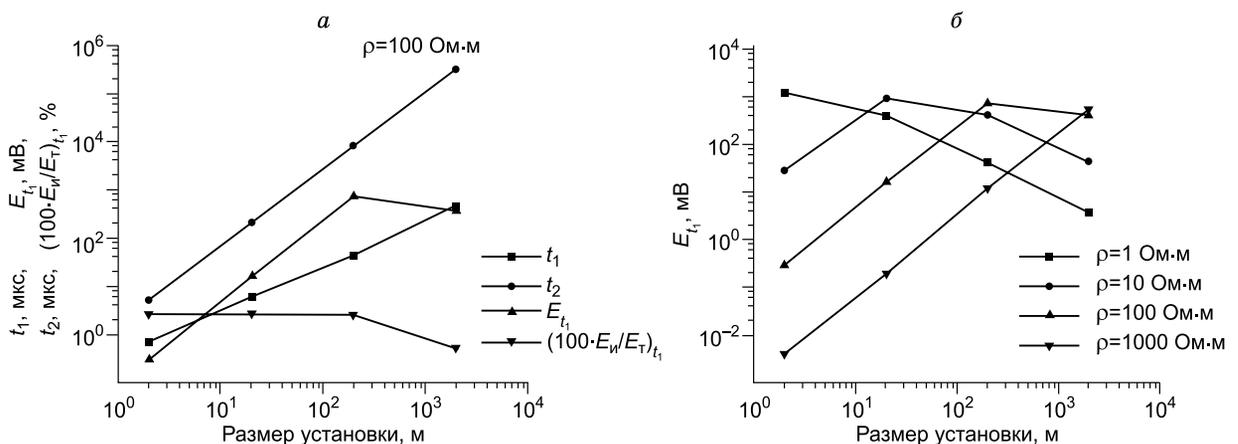
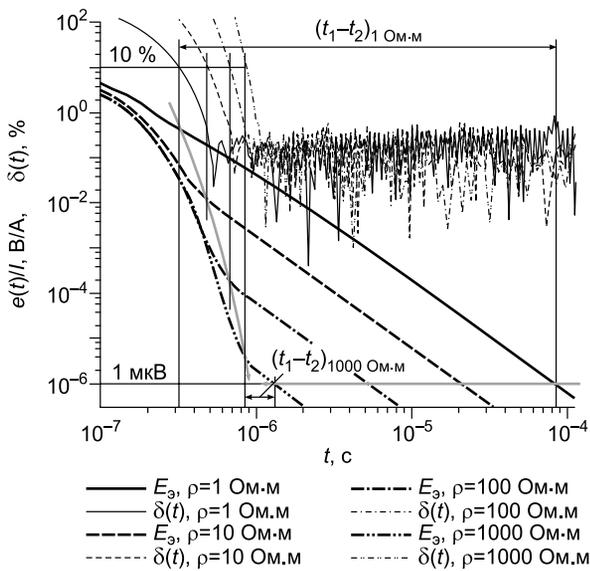


Рис. 7. Параметры, зависящие от размера установки (*a*), и графики зависимости уровня сигнала в точке  $t_1$  от размера установки на разных разрезах (*b*).



**Рис. 8. Границы доверия для псевдоэкспериментальных сигналов от разных разрезов на примере установки 2 м.**

Стоит добавить, что с ухудшением проводимости земли на порядок, сигнал отклика ослабевает на полтора порядка (см. рис. 8). Вследствие этого длительность полезного сигнала от слабопроводящей среды укорачивается, затрудняет борьбу с шумом и усложняет интерпретацию. Уменьшение размера установки дополнительно усугубляет ситуацию, так как с уменьшением размера на порядок сигнал, отвечающий за одну и ту же глубину зондирования, уменьшается на четыре порядка. Поэтому в первую очередь уменьшение размера установки сказывается в худшую сторону именно на разрезах с большим удельным сопротивлением.

Из приведенных выше рассуждений получается, что мало иметь участок кривой отклика в пределах границ доверия. Необходимо, чтобы его протяженность была достаточной. Если учесть, что исследователя интересуют, прежде всего, неоднородности, которые имеются в геологическом разрезе, то становится понятной необходимость усложнения модели разреза для численного определения способности установки работать на малых глубинах. Для этого было решено использовать двухслойную модель разрезов с горизонтальными слоями. Рассчитывая экспериментальные сигналы для последовательности разрезов с разной глубиной расположения границы между слоями, этим самым, отодвигая раз за разом условную точку перегиба на регистрируемой кривой становления от начала уверенного приема качественного сигнала  $t_1$ , и используя эти данные для решения обратной задачи, можно по стабильности результатов интерпретации определить верхний порог чувствительности установки по глубине зондирования.

Эксперимент выполняется в нижеприведенной последовательности.

1. По выбранной двухслойной модели разреза и определенной установке рассчитываются теоретические кривые для геоэлектрического разреза профиля с погружающимся основанием.
2. Теоретические сигналы используются для создания независимого источника ЭДС в эквивалентной схеме геофизической установки (см. рис. 1) и расчета соответствующего псевдоэкспериментального сигнала ЭДС.
3. Полученные кривые корректируются с помощью сдвига по времени (в соответствии с графиком рис. 3, б).
4. Из рассчитанных кривых вырезаются участки  $[t_1, t_2]$  согласно графикам рис. 6, в которых содержится пригодная для интерпретации информация.
5. Подготовленные кривые ЭДС используются в качестве входных данных для программы решения обратной задачи. Для каждой точки профиля вычисляются мощности слоев. Сначала это делается с привлечением полной априорной информации. Затем информация ограничивается сопротивлением верхнего слоя, а затем и полностью убирается.
6. По полученным данным строятся геоэлектрические разрезы и проводится анализ.

На рис. 9 приведены примеры расчетов для установок размером 200, 20 и 2 м и сопротивлениями слоев геоэлектрического разреза 50 и 100 Ом·м. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что установка с размером генераторной петли 200 м и приемной петли 100 м способна без какой-либо априорной информации определить границу двухслойного разреза, начиная с глубины порядка 1/4 от размера стороны излучателя. Для установки, уменьшенной на порядок, и тем более для установки размером 2 м успешное решение аналогичной задачи потребует априорной информации о верхнем слое.

Очевидно, что приведенные расчеты не остановят пытливых экспериментаторов от попыток использования малых установок. Можно помочь им в этом, приведя данные численного эксперимента, показывающего как вынос приемной петли за пределы излучателя позволяет сократить время воздействия прямой наводки и тем самым улучшить возможности на малой глубине (см. рис. 10). Данный прием оставляет возможность качественной интерпретации получаемого материала, но приводит к некоторым отрицательным моментам: уменьшается уровень полезного сигнала на начальном этапе, появляется переход через нулевую отметку, вносится неопределенность в позиционирование. Несмотря на это, изме-

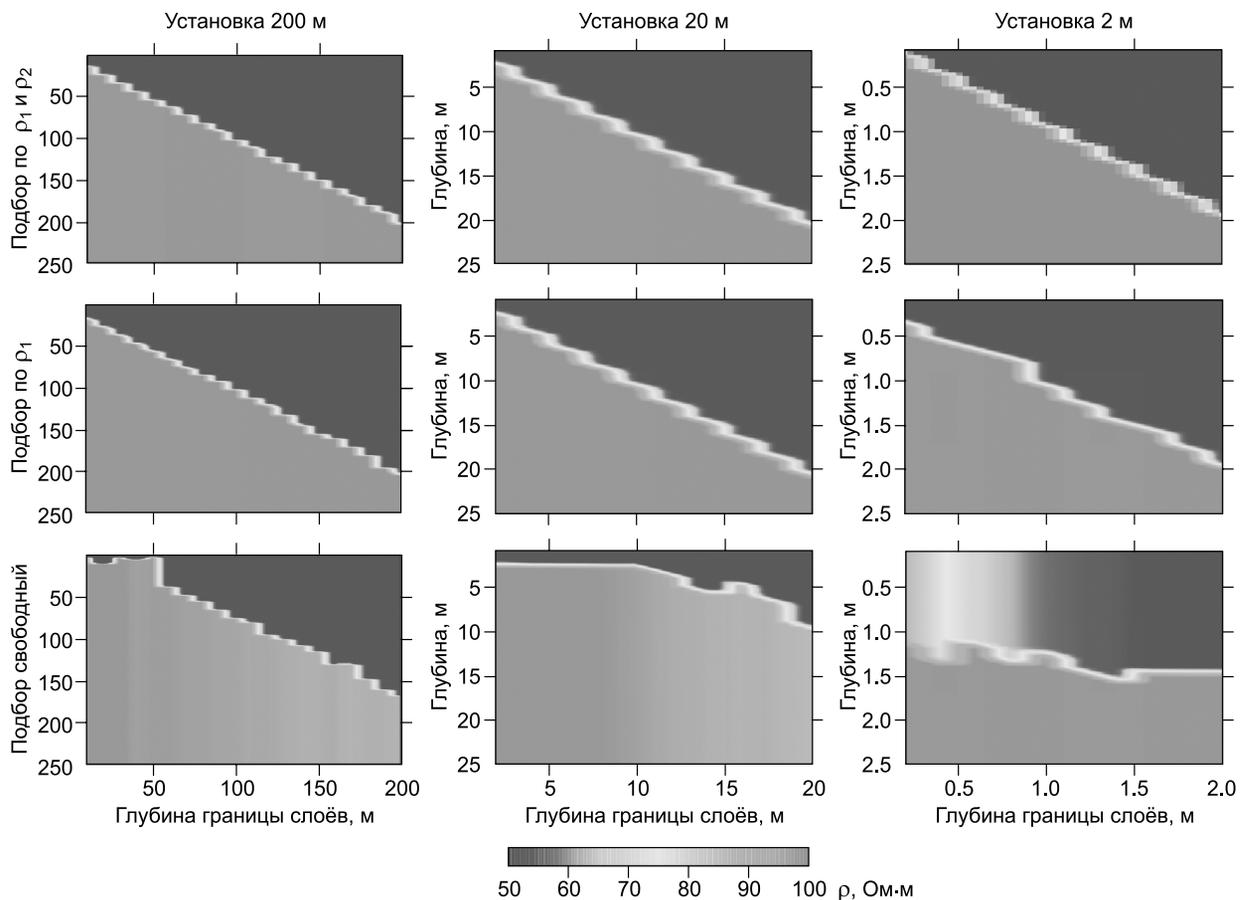


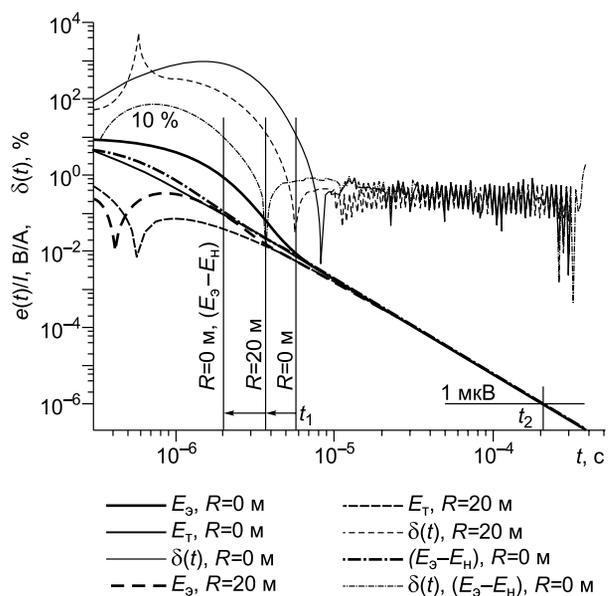
Рис. 9. Геоэлектрические двухслойные разрезы с равномерным погружением основания.

рения разнесенной установкой определенно приводят к положительному результату, способствуя более спокойному протеканию нежелательных переходных процессов в системе. Для сравнения помимо графиков соосной установки используются возможности численного эксперимента и приводятся данные для воображаемого случая при отсутствии прямой наводки.

Теоретически полностью избавиться от прямой наводки позволяет применение различного рода дифференциальных установок. Отсутствие возможности качественной интерпретации является существенным минусом таких измерений. Однако, имея хорошую чувствительность к неоднородностям на соразмерных с установкой глубинах, такой метод зондирования может оказаться единственно возможным для отдельных видов работ, например по оконтуриванию предмета поиска на малой глубине залегания.

Рис. 10. Уменьшение прямой наводки выносом приемника за пределы излучателя.

Установка 20 м,  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .



## ВЫВОДЫ

Полученные результаты не противоречат общим расчетам, приведенным в статье [Кожевников, Плотников, 2004] и позволяют их дополнить. Показано, с какими петлями необходимо работать в индуктивной электроразведке, чтобы получить результат на малых глубинах, и какие физические процессы этому мешают. Выведена зависимость глубины зондирования от размеров приемника, его частотной характеристики и начального времени регистрации на разных геофизических разрезах. В статье сделано важное замечание о том, что на ранних временах генераторная и приемная рамки связаны не только посредством магнитного поля затухающих в земле вихревых токов, но и через прямую индуктивную и емкостную связи. Это влияние вносит ограничение на действие выведенных формул. В настоящей работе эти ограничения выявлены в совокупности с инерционными свойствами петель в виде временных отметок, начиная с которых регистрируемый сигнал может нести достоверную информацию о среде.

В целом по результатам численного эксперимента можно сделать следующий вывод: применение установок малого размера с целью уменьшения глубины зондирования вполне возможно в определенных благоприятных условиях. Этому способствует повышенная проводимость земли на месте измерений и наличие априорной информации.

## ЛИТЕРАТУРА

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

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

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

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

**Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.** Инверсия данных МПП с учетом быстро протекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризуемого полупространства // Геофизика, 2007, № 1, с. 42—50.

**Чернышов Н.Г., Чернышова Т.И.** Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench. Тамбов, Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005, 52 с.

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

*Поступила в редакцию  
8 февраля 2013 г.*