

**ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ЗОНДИРОВАНИЯ ГРАНИЦ НЕФТЕНАСЫЩЕННОГО ПЛАСТА ШИРОКОПОЛОСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЗОНДОМ**

К. В. Музалевский, В. Л. Миронов, М. И. Михайлов

Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, Академгородок, 50/38  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

*На крупномасштабном радарном стенде ИФ СО РАН проведены эксперименты по зондированию модельной нефтенасыщенной среды лабораторным макетом импульсного электромагнитного зонда, который располагался в цилиндрической оболочке промышленно выпускаемой скважинной каротажной аппаратуры ВИКИЗ. На основе измерения временных форм импульсных сигналов на выходе приемной антенны в зависимости от расстояния между передающей и приемной антеннами найдена скорость распространения и затухание зондирующих импульсов. Экспериментально обоснована возможность регистрации зондирующих импульсов, проходящих в толще модельной нефтенасыщенной среды расстояние до 2,65 м. При этом был достигнут динамический диапазон приемопередатчика зонда 128,3 дБ, что позволяет обнаружить границу модельного нефтенасыщенного пласта на расстояниях до 1,3 м. Кроме того, показано, что временные формы зондирующих импульсов, измеренные на выходе приемной антенны зонда, с высокой точностью описываются теоретической моделью.*

*Ключевые слова:* нефтегазовый коллектор, скважинный радар, сверхширокополосные импульсы.

Vestnik SibGAU  
2014, No. 3(55), P. 217–223**POTENTIAL OF DETECTION RANGE OF BORDERS OF OIL RESERVOIR USING LOGGING TOOL WITH BROADBAND ELECTROMAGNETIC PULSE**

K. V. Muzalevskiy, V. L. Mironov, M. I. Mikhailov

The Institute of Physics of the Academy of Sciences  
50, bld. 38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

*On large-scale radar stand at the IF SB RAS, the experiments on sensing of oil-saturated sand using the laboratory pulsed electromagnetic logging tool, which was placed in a cylindrical shell of a commercially available borehole logging tool (VIKIZ), were conducted. For this purpose a big wood box (1.5m × 3.2m × 2.7m) filled moist sand moisturized with brine was built. The box was located in a laboratory room on a concrete screed. Borehole radar antennas are resistively loaded dipole antenna with extended bandwidth. The transmitting antenna was connected to the hi-voltage (~3kV) generator, the receiving antenna to the stroboscopic oscilloscope. With variation of the distance between the transmitting and receiving antennas the signals of receiving pulses were recorded. On the basis of measurements of the pulse shapes at the output of the receiving antenna, depending on the distance between the transmitting and receiving antennas were found propagation velocity and attenuation of sensing pulses. Experimentally was proved the possibility of recording probe pulses, that propagates in the oil-saturated sand at the distance up to 2.65 m. At given dynamic range of the logging tool transceiver (128.3 dB), the boundary of the oil-saturated sand can be detected at the distances up to 1.3 m. Furthermore it is shown that temporary forms of sensing pulses measured at the output of the receiving antenna of the logging tool are described theoretical model with high accuracy. The results of this study allow you to plan and start bench testing of prototypes borehole probes.*

*Keywords:* oil and gas reservoir, borehole radar, UWB pulses.

**Введение.** В последнее время развиваются методы электромагнитного импульсного каротажа из скважины пластов нефтегазового коллектора [1–5]. В работах [5–11] теоретически изучены принципиальные возможности использования сверхширокополосного электромагнитного импульсного зонда (СЭМИЗ) для

геонавигации бурового инструмента относительно водонефтяного контакта (ВНК) водоплавающей нефтяной залежи при бурении горизонтальных скважин. Однако экспериментальное обоснование каротажа нефтенасыщенной среды нефтегазового коллектора с использованием предложенной в работе [3; 7; 12; 13]

конструкции зонда в условиях масштабов зондируемой среды, близких к натурным, не проводилось. В данной работе с целью обоснования принципиальной возможности обнаружения границы ВНК нефтенасыщенного пласта и оценки необходимого динамического диапазона приемопередатчика скважинного зонда проведены эксперименты по зондированию модельной нефтенасыщенной среды лабораторным макетом СЭМИЗ. Условия крупномасштабного радарного стенда Института физики (ИФ) СО РАН позволили сформировать модельный нефтенасыщенный слой толщиной ~1 м, близкий к наблюдаемым в реальных условиях нефтегазового коллектора. При этом макет СЭМИЗ был помещен в специальную цилиндрическую оболочку промышленно выпускаемой скважинной аппаратуры ВИКИЗ. Петрофизические параметры нефтенасыщенной среды были выбраны близкими к характеристикам песчаных нефтегазовых коллекторов Сибири. При моделировании скважинного зонда выбрана более реалистичная электродинамическая модель, которая учитывает влияние диэлектрического корпуса зонда, геометрию экспериментальной установки и конструкцию антенн СЭМИЗ.

**Описание экспериментальной установки.** Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Деревянный бак размером (1,5 м × 3,2 м × 2,7 м) заполнялся влажным песком в виде треугольной призмы с высотой треугольного основания 1,1 м. Бак не имел деревянного основания и размещался непосредственно на полу лабораторного помещения. Были проведены исследования строения среды под полом лабораторного помещения (рис. 1).

Пол лабораторного помещения представляет собой бетонную стяжку толщиной 80 мм, под бетонным полом расположен слой песчано-гравийной смеси (ПГС) толщиной 140 мм, слой ПГС лежит на полупространстве, состоящем из суглинка (объемная влажность 13,5 %). Каркас бака изготовлен из бруса и обшит половой доской толщиной 28 мм. Внутри бак был покрыт полиэтиленовой пленкой, герметично запаянная сверху. В баке размещалась стеклотекстолитовая труба с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 4,6$ , длиной 3,5 м, с внешним и внутренним диаметром 11 и 6,5 см соответственно. Данная стеклопластиковая труба используется в качестве оболочки в аппаратуре ВИКИЗ и была предоставлена нам для эксперимента компанией ОАО «НПО «Луч», г. Новосибирск. Труба закреплена на торцевых сторонах бака (3240 мм × 1540 мм) на расстоянии 17,8 см от дна бака. Пространство бака заполнялось влажным песком, сформированным в виде треугольной призмы (рис. 1). Вся конструкция находилась в помещении с температурой 22 °С.

Приемопередатчик макета СЭМИЗ состоял из генератора импульсов, двух дипольных антенн и цифрового стробоскопического осциллографа. Дипольные антенны передатчика  $T$  и приемника  $R$ , разнесённые на расстояние  $L$  друг от друга, находились внутри стеклотекстолитовой трубы. Передающая антенна возбуждалась генератором высоковольтных импульсов напряжения ГИН–2–02 производства ЗАО «ФИД-Технология», г. Санкт-Петербург. Длительность импульсов на уровне половины амплитуды составляла 0,8 нс, частота повторения импульсов 10 кГц, выходное сопротивление генератора 50 Ом по постоянному

току. Стробоскопический осциллограф (фирма «Трим», TMR8120M) позволил проводить измерения напряжения и формы импульсов в полосе частот 0–20 ГГц при уровне шума 3 мВ. Временная форма импульса и его нормированный спектр на выходе генератора ГИН–2–02, измеренные с помощью стробоскопического осциллографа, приведены на рис. 2.

Частота спектра импульса напряжения на выходе генератора в точке максимума равна 0,214 ГГц, а ширина спектра  $\Delta f$  по уровню 0,5 составляет  $\Delta f_{0,5} = f_{\max} - f_{\min} = 0,558$  ГГц ( $f_{\max} = 0,558$ ,  $f_{\min} = 0,0$ ). Коэффициент широкополосности импульса на выходе генератора, определенный по формуле  $\Delta F = 2(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min})$ , равен 2. Данный импульс является широкополосным ( $\Delta F > 1$ ). Отношение ширины спектра импульса к его центральной частоте равно 2,6 и близко к коэффициенту широкополосности.

Антенны скважинного радара представляют собой диполь с расширенной полосой пропускания [14]. Плечи диполя имеют цилиндрическую форму с конической центральной частью. Длина диполя 135 мм. Для уменьшения влияния токов, наводимых на внешней поверхности трубки, в которой размещен коаксиальный кабель, применены запирающие стаканы в виде короткозамкнутых отрезков коаксиальных линий длиной 125 мм с волновым сопротивлением 95 Ом, расположенных на расстоянии 30 мм друг от друга и от торца диполя. Внешний диаметр передающей и приёмной антенны равен 64,5 мм, длина с учетом трех запирающих стаканов составляет 620 мм. Внешний вид передающей/приёмной антенны изображен на рис. 3.

**Спектры комплексной диэлектрической модельной нефтенасыщенной среды.** Для эксперимента была подготовлена модельная среда, соответствующая петрофизическим характеристикам нефтенасыщенного слоя песчаных нефтегазовых коллекторов Сибири. Модельная среда представляла собой смесь песка, увлажненного водопроводной водой с растворенной поваренной солью. При этом объемная влажность песчаника составляла 5,7 %, солёность солевого раствора задавалась 17 г/л. Спектры комплексной диэлектрической проницаемости модельной среды были измерены коаксиально волновым методом в диапазоне частот от 0,04 до 15 ГГц на диэлектрической установке с использованием коаксиальных ячеек и векторного анализатора цепей ZVK фирмы Rohde-Schwarz. Методика измерений подробно изложена в работе [15]. Измеренные спектры действительной  $\text{Re}(\varepsilon)$  и мнимой  $\text{Im}(\varepsilon)$  частей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП)  $\varepsilon$  модельной среды изображены на рис. 4. Теоретическая интерпретация спектров КДП среды была проведена на основе рефракционной диэлектрической модели [15]. Согласно [15] показатель преломления  $n$  и нормированный коэффициент затухания  $\kappa$  смеси, состоящей из сухого песка и воды, можно представить в форме рефракционной диэлектрической модели:

$$n = n_d + (n_w - 1)W_w, \quad (1)$$

$$\kappa = \kappa_d + \kappa_w W_w. \quad (2)$$

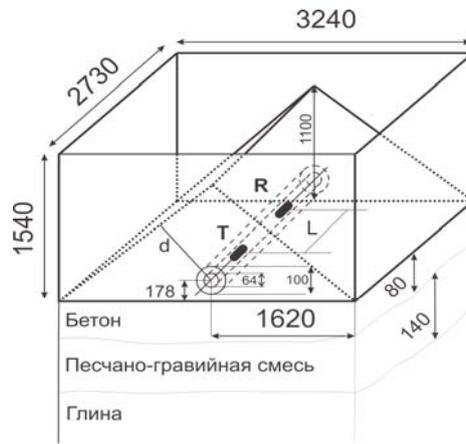


Рис. 1. Схема крупномасштабного лабораторного радарного стенда (все размеры даны в мм)

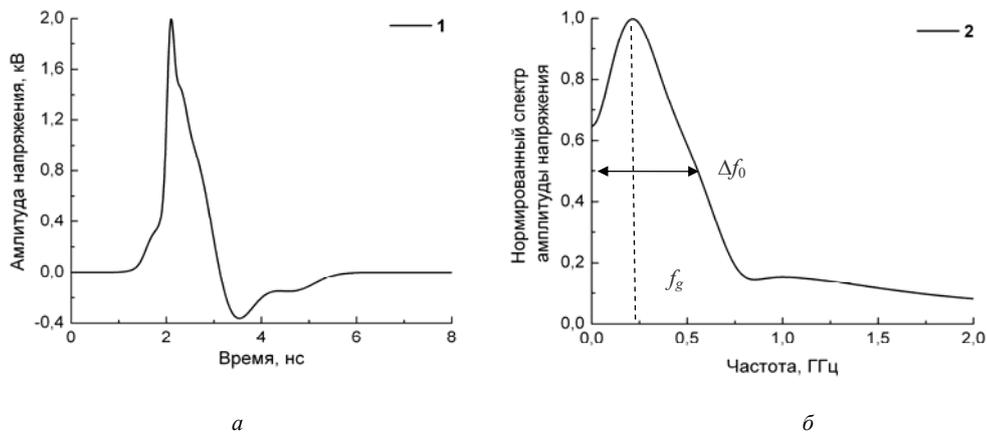


Рис. 2. Импульс напряжения (а) и спектр (б) выходного сигнала генератора



Рис. 3. Фотография антенны

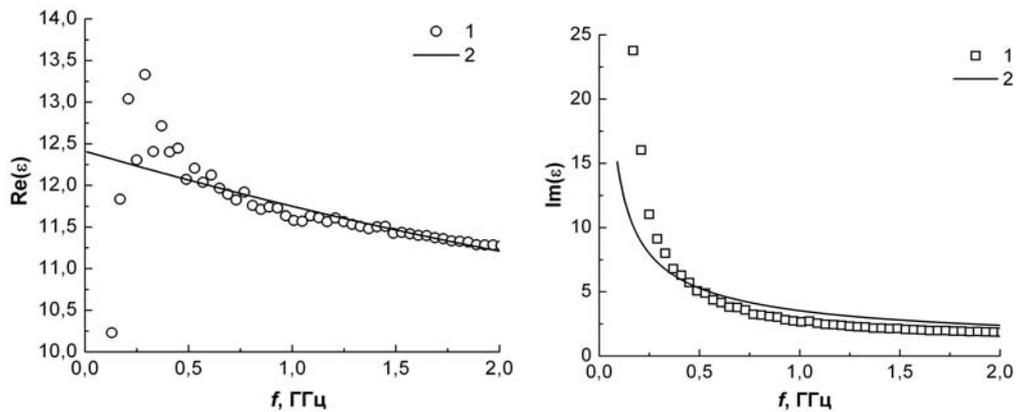


Рис. 4. Спектры действительной  $Re(\epsilon)$  и мнимой  $Im(\epsilon)$  частей комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  смеси песка и водного раствора поваренной соли: 1 – экспериментальные данные; 2 – рефракционная модель

Индексы  $s, d, w$  относятся к влажному образцу, сухому образцу и водному раствору соответственно. Коэффициент преломления  $n$  и нормированный коэффициент затухания  $\kappa$  связаны с действительной  $\varepsilon' = \operatorname{Re} \varepsilon$  и мнимой  $\varepsilon'' = \operatorname{Im} \varepsilon$  частями КДП  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ , где  $i$  – мнимая единица, формулами

$$n = \sqrt{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \varepsilon'^2} / \sqrt{2}, \quad (3)$$

$$\kappa = \sqrt{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon'^2} / \sqrt{2}. \quad (4)$$

КДП водного солевого раствора описывалась в виде формулы Дебая:

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{w,\infty} + \frac{\varepsilon_{w,s} - \varepsilon_{w,\infty}}{1 - i2\pi f \tau_w} + i \frac{\sigma_w}{\omega \varepsilon_0}. \quad (5)$$

В выражении (5) величина  $f$  обозначает частоту электромагнитного поля, величины  $\sigma_w, \tau_w, \varepsilon_{w,s}$  и  $\varepsilon_{w,\infty}$  обозначают омическую проводимость, время релаксации, низкочастотный и высокочастотный пределы относительной диэлектрической проницаемости. Величина  $\varepsilon_0$  обозначает диэлектрическую проницаемость вакуума, которая равна  $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. На основе формул (1)–(5) была проведена нелинейная аппроксимация экспериментальных спектров, изображенных на рис. 4, в случае следующих свободных параметров:  $n_d, \kappa_d, \varepsilon_{w,\infty}, \varepsilon_{w,s}, \sigma_w, \tau_w$ . Соответствующие параметры, стремящиеся к минимуму, среднеквадратичное отклонение экспериментальных спектров от рассчитанных теоретически составили значения:  $n_d = 2,89, \kappa_d = 0,15, \varepsilon_{w,\infty} = 4,9, \varepsilon_{w,s} = 73,6, \sigma_w = 0,02$  см/м,  $\tau_w = 8,7 \cdot 10^{-12}$  с. С использованием найденных параметров и формул (1)–(5) построены теоретические спектры КДП среды (рис. 4, кривая 2).

**Характеристики импульса, излучаемого в среде.** На рис. 5 и 6 представлены временная форма и спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны СЭМИЗ при расположении антенн на расстоянии 0,5 м друг от друга. Этот импульс содержит, кроме прямой волны, распространяющейся из излучающей антенны в приемную, также и волны, отраженные от дна, стенок, торцов бака и границ «воздух–песок» (боковая грань призмы, см. рис. 1). Так как амплитуды отраженных импульсов много меньше амплитуды импульса прямой волны, то импульс, изображенный на рис. 5, можно приближенно принять за импульс, распространяющийся в пространстве около трубы. Спектр этого импульса показан на рис. 6.

Искажение временной формы этого импульса, по сравнению с импульсом на выходе генератора (см. рис. 2), вызвано тем, что ширина амплитудно-частотной характеристики приемопередающего тракта СЭМИЗ уже, чем ширина спектра импульса, подаваемого на вход передающей антенны. В результате фильтрации ширина спектра импульса на выходе приемной антенны уменьшилась, а его длительность, соответственно, увеличилась. На рис. 5 показана также огибающая импульса, которая была рассчитана как модуль амплитуды комплексного аналитического сигнала, рассчитанного для данного импульса. Дли-

тельность излученного в среду импульса (по уровню 0,5 от максимума огибающей импульса) равна 5,6 нс. Параметры частотного спектра импульса, излучаемого в среду, оказались следующие: частота спектра в точке максимума равна  $f_p = 0,363$  ГГц, ширина спектра  $\Delta f_{0,5} = 0,151$  ГГц, коэффициент широкополосности  $\Delta F = 0,4$ . Излучаемый в среду импульс является относительно узкополосным ( $\Delta F < 1$ ). Рассмотрим далее процесс отражения зондирующего импульса от боковых границ (песок–воздух) треугольной призмы.

На рис. 7 представлены результаты измерения напряжения на приемной антенне для двух расстояний между передающей и приёмной антеннами в случае, когда на боковые грани призмы (см. рис. 1) были положены металлические листы. Импульс (а) на рис. 7 сформирован волной, распространяющейся вдоль оси СЭМИЗ, импульс (б) сформирован суммой двух волн, отраженных от двух боковых граней призмы, которые, когерентно складываясь, создают эффект усиления сигнала, импульс (с) сформирован волнами, отраженными от торцевых стенок бака.

На основе измеренных временных форм импульсов, подобных показанным на рис. 7, были определены временные задержки и относительное затухание амплитуды импульсов, отраженных от боковых граней призмы (импульс, обозначенный индексом (б) на рис. 7), при различном разnose передающей и приемной антенн. В результате этого были рассчитаны скорость распространения  $V_p = 0,07$  м/нс и коэффициент удельного затухания  $\Gamma_p = 44,9$  дБ/м зондирующего импульса, распространяющегося в среде призмы.

На основе измеренных спектров КДП среды, приведенных на рис. 4, была оценена групповая скорость и коэффициент затухания волнового пакета на средней частоте зондирующего импульса 0,36 ГГц (см. рис. 6). Значение удельного коэффициента затухания и групповой скорости импульса оказались равными  $\Gamma_f = 48,4$  дБ/м и  $V_g = 0,09$  м/нс соответственно. Из сравнения измеренных с помощью скважинного зонда и рассчитанных величин ( $\Gamma_p$  и  $\Gamma_f$  и  $V_p$  и  $V_g$ ) следует, что подобным образом рассчитанные удельный коэффициент затухания и скорость распространения импульса с погрешностью 7 и 22 % соответственно отклоняются от экспериментально измеренных. Следовательно, данный подход может быть использован для определения эффективного коэффициента поглощения и показателя преломления на средней частоте зондирующего импульса.

Глубина зондирования (при которой амплитуда принятого импульса равна уровню собственных шумов осциллографа) в данном эксперименте составила 0,97 м (при расстоянии между передающей и приёмной антеннами 1,8 м). Используя геометрическое приближение  $l_{\text{эф}} = \sqrt{4d^2 + L^2}$  для оценка длины траектории распространения отраженного импульса, получим  $l_{\text{эф}} = 2,65$  м. С учетом измеренной величины удельного коэффициента затухания амплитуды зондирующего импульса  $\Gamma_f$  находим, что динамический диапазон системы был не хуже чем 128,3 дБ. Исходя из достигнутого динамического диапазона лабораторного макета скважинного зонда и найденного удельного

коэффициента затухания  $\Gamma_f$ , при размещении приемной и передающей антенны на расстоянии 0,27 м (расстояние между фазовыми центрами диполей) предельная дальность зондирования нефтенасыщенного слоя может составить 1,32 м.

**Теоретическое моделирование скважинного зонда.** Для корректного теоретического моделирования макета сверхширокополосного каротажного зонда, с учётом конструкции антенн, оболочки зонда и

конечных размеров бака радарного стенда, была использована программа численного трёхмерного расчета электромагнитных полей (Microwave Studio) и диэлектрическая модель (1)–(5), которая учитывает петрофизические характеристики среды в объеме трехгранной призмы. Теоретически рассчитанные временные формы импульсов напряжения на выходе приемной антенны СЭМИЗ в сравнении с экспериментальными данными показаны на рис. 8.

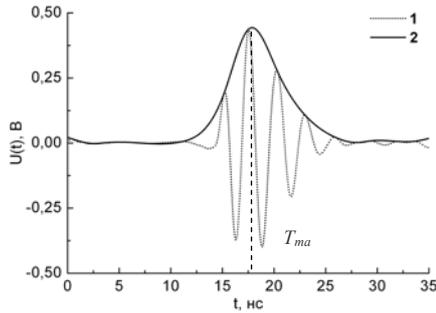


Рис. 5. Импульс напряжения на выходе приемной антенны (1) и его огибающая (2)

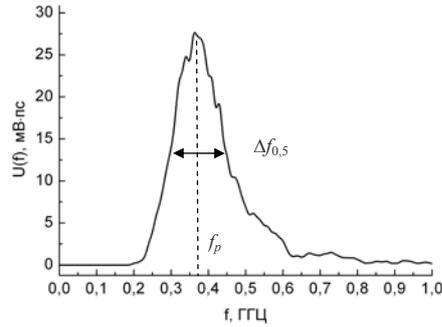


Рис. 6. Спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны

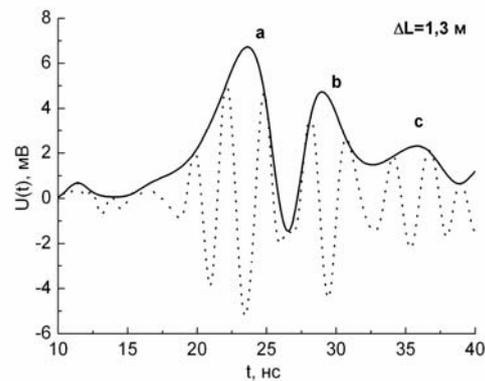
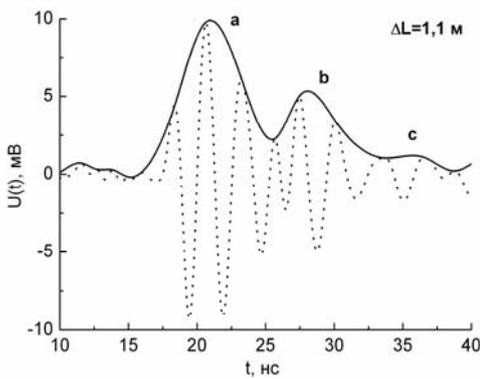


Рис. 7. Временные формы импульсов (пунктирная линия) и соответствующие огибающие (сплошная линия) на выходе приемной антенны при различном расстоянии между передающей и приёмной антеннами

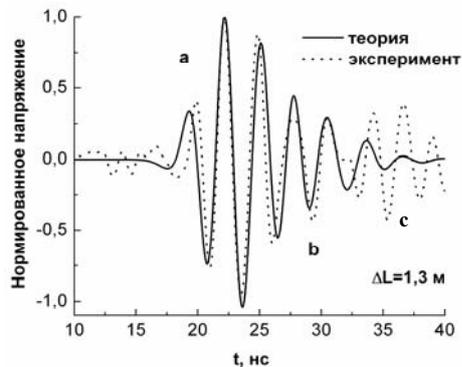
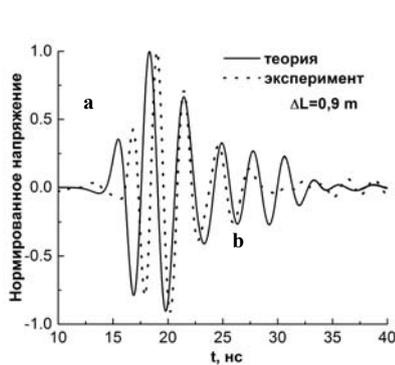


Рис. 8. Нормированные временные формы импульсов на выходе приемной антенны при разное антенн на расстоянии  $\Delta L = 0,9$  и  $\Delta L = 1,3$  м,  $D = 0,97$  м. Сплошная и пунктирная линии соответствуют расчету и эксперименту (в случае отсутствия металлического отражателя на верхних гранях призмы)

Рассчитанная и измеренная форма импульсов прямого (а) и отраженного от боковой грани призмы (b) сигнала хорошо согласуются друг с другом. Однако при теоретическом моделировании не удалось корректно описать импульс (с), связанный с отражением волны от торцевой стенки бака.

**Заключение.** Полученные с использованием крупномасштабного радарного стенда результаты демонстрируют согласие измеренных и рассчитанных с помощью предложенной в проекте модели нефтенасыщенной среды и модели каротажного зонда. Удовлетворительное соответствие теоретического моделирования форм и временных задержек импульсов с экспериментальными данными, полученными на крупномасштабном радарном стенде, позволяют проводить теоретическое моделирование опытных образцов скважинных радаров в средах нефтегазового коллектора, спланировать и начать их стендовые испытания. Кроме того, экспериментально доказана принципиальная возможность регистрации зондирующего сигнала, отраженного от границы модельного нефтенасыщенного пласта толщиной до 1,3 м, при динамическом диапазоне приемопередатчика зонда 128,3 дБ. Достигнутая дальность зондирования на 30 % превосходит предельную дальность зондирования имеющихся аналогов (аппаратура ВИКИЗ).

#### Библиографические ссылки

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. Vol. 40, No. 9. P. 2083–2092.
2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. Vol. 37, No. 4. P. 1940–1950.
3. Epov M. I. [et al.]. A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging // *Russian Geology And Geophysics.* 2013. Vol. 54, No. 9. P. 1103–1107.
4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electromagnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface // *Russian Geology and Geophysics.* 2009. Vol. 50, № 1. P. 46–52.
5. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011 г. С. 110
6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation // *Russian Geology and Geophysics.* 2007. Vol. 48, No. 12. P. 1054–1060.
7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. Geosteering Technology of Drilling Tool in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir // *Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON.* 2011. P. 155–158.
8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool. to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas // *Proceedings PIERS (September 12–16). Suzhou, CHINA.* 2011. P. 59–62.

9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool // in *Proceedings IGARSS (2010, July 25–30). Honolulu, USA.* P. 3565–3567.

10. Музалевский К. В. Измерение частотных спектров комплексной диэлектрической проницаемости нефтенасыщенных горных пород с помощью скважинного зонда // *Вестник СибГАУ.* 2011. Т. 40, № 7. С. 127–131.

11. Эпов М. И., Кабанихин С. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Шишленин М. А. Сравнительный анализ двух методов расчета электромагнитных полей в прискважинном пространстве нефтегазовых коллекторов // *Сиб. журн. индустр. матем.* 2011. Т. 14, № 2. С. 132–138.

12. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Кабанихин С. И. Применение метода дискретных источников для расчёта полей СШП импульсного электромагнитного дипольного зонда в средах нефтегазового коллектора // *Известия вузов. Физика.* 2010. Т. 53, № 9/3. С. 257–262.

13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media // in *PIERS Preceeding.* 2009. Vol. 1. P. 303–305.

14. Балзовский Е. В. Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосная дипольная антенна с резистивными плечами : научное издание // *Радиотехника и электроника.* 2004. Т. 49, № 4. С. 460–465.

15. Эпов М. И. [и др.]. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0,05–16 ГГц // *Геология и геофизика.* 2009. Т. 50, № 5. С. 613–618.

#### References

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, vol. 40, no. 9, p. 2083–2092.
2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999, vol. 37, no. 4, p. 1940–1950.
3. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N., Salomatov U. P., A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging. *Russian Geology and Geophysics.* 2013, vol. 54, no. 9, p. 1103–1107.
4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electromagnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface. *Russian Geology and Geophysics.* 2009, Vol. 50, no. 1, p. 46–52.
5. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. *Sverkhshirokopolosnoye elektromagnitnoye zondirovaniye neftegazovogo kollektora* [Ultra-wideband electromagnetic sounding of the oil and gas reservoir]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2011, 110 p.
6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation. *Russian Geology and Geophysics.* 2007, vol. 48, no. 12, p. 1054–1060.
7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N., Geosteering Technology of Drilling Tool

in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir. Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. 2011, p. 155–158.

8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas. Proceedings PIERS. 2011, September 12-16, Suzhou, CHINA. P. 59–62.

9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool. in Proceedings IGARSS. 2010, July 25-30, Honolulu, USA. P. 3565–3567.

10. Muzalevskiy K.V. [Measurement of the frequency spectra of the complex permittivity of the oil-saturated rocks using the logging tool] *Vestnik SibGAU*. 2011, vol. 40, no. 7, p. 127–131. (In Russ.)

11. Epov M. I., Kabanikhin S. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Shishlenin M. A. [A comparative analysis of two methods for calculating electromagnetic fields in the near-well space of oil and gas collectors]. *Sib. Zh. Ind. Mat.* 2011, vol. 14, no. 2, p. 132–138. (In Russ.)

12. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Kabanikhin S. I. [Application of the method of discrete sources to calculate the pulsed electromagnetic fields UWB dipole probe in environments of oil and gas reservoir]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2010, no. 9/3, p. 257–262. (In Russ.)

13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media. *PIERS Preceeding*. 2009, Vol. 1, p. 303–305.

14. Balzovskiy Ye. V., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. [UWB dipole antenna with resistive shoulders scientific publication]. *Radiotekhnika i elektronika*. 2004, vol. 49, no. 4, p. 460–465. (In Russ.)

15. Epov M. I., Bobrov P. P., Mironov V. L., Repin A. V. Dielectric relaxation in oil-bearing clayey rocks. *Russian Geology and Geophysics*. 2011, Vol. 52, no. 9, p. 1028–1034.

© Музалевский К. В., Миронов В. Л., Михайлов М. И., 2014