

## **Новые возможности электромагнитного зондирования с контролируемым источником**

Л.Б. Волкомирская<sup>1,2</sup>, В.В. Варенков<sup>1,2</sup>, О.А. Гулевич<sup>1,2</sup>, В.И. Сахтеров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН*

142190, г. Москва, г. Троицк. E-mail: [mila@izmiran.ru](mailto:mila@izmiran.ru)

<sup>2</sup> *ЗАО «Таймер»*

142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Лесная 4Б.

*В работе обсуждаются возможности электромагнитного зондирования сверхмощными георадарами серии GROT 12 в сравнении с методами электроразведки и сейсморазведки. Представлены примеры совместного использования этих методов.*

*In the paper the prospects of electromagnetic sounding with a use of GROT 12 series superpowerful georadars are discussed in comparison with electric prospecting and seismic exploration. The examples of joint use of those methods are presented.*

С уменьшением количества легкодоступных месторождений углеводородов и смещении геологоразведочных работ в районы с тяжёлыми климатическими условиями и на глубоководные морские акватории возрастает стоимость добычи сырья. Совершенствование геофизических методов ведет к снижению стоимости ввода в эксплуатацию новых продуктивных скважин, в первую очередь, за счёт эффективности применения геофизических методов на стадии, предшествующей разведочному бурению. Известны два типа физических полей, обеспечивающих дистанционное зондирование глубоко залегающих месторождений углеводородов: сейсмическое и электромагнитное. Традиционно, по объективным причинам, преимущество отдавалось сейсмическим полям, особенно при работе на акваториях. Однако, в последнее десятилетие, ситуация стала быстро меняться. Это связано с серией новых, практически важных результатов, полученных при зондировании земной поверхности с использованием контролируемого источника на суше и в акваториях в широком диапазоне частот  $10^{-1}$ - $10^9$  Гц, различными научными коллективами во многих странах. Ниже обсуждаются полученные за последние 5 лет результаты и ближайшие перспективы электромагнитных исследований месторождений углеводородов. Приводятся результаты электромагнитного зондирования с контролируемым источником в широком диапазоне частот, полученные в последние годы в России и за рубежом и анализируются ближайшие перспективы развития и использования новых технологий электромагнитного зондирования.

Сейсмические и электромагнитные методы зондирования более века являются основным источником информации о глубинном строении земной коры на суше и в акваториях. Особенно активно они развиваются после Второй мировой войны на технологических заделах, сформированных при создании и совершенствовании новых систем вооружений. Прямая корреляция прослеживается между прогрессом в экспериментальных возможностях этих методов и успехами в электронике, создании ЭВМ и систем связи, развитии технологии обнаружения подводных лодок. По своей природе оба метода относятся к волновым косвенным геофизическим методам, позволяющим получать в результате решения обратных задач сейсмического и электромагнитного зондирования информацию о параметрах среды, содержащуюся в характеристиках волн, отражённых от структурных неоднородностей. Для обоих

методов значения их основных параметров в среде определяются в большинстве случаев одними и теми же причинами – структурой, текстурой пород, их флюидосодержанием, которые, в свою очередь, связаны с литологией, пористостью (пустотностью) и другими свойствами, имеющими природное или техногенное происхождение.

Решение обратной задачи упрощается, если есть достаточно ясное представление о том, как решать прямую задачу, т.е. задачу распространения сейсмических и электромагнитных сигналов, прошедших сквозь среду от источника к приёмнику. Экспериментально прямая задача связи в среде с высокой проводимостью, которая является одной из составляющих комплексного коэффициента диэлектрической проницаемости, несколько проще изначально решалась в сейсмоакустике на примере распространения в морской воде. После получения американскими и английскими учёными результатов сейсмического зондирования в Мексиканском заливе в пятидесятые годы прошлого столетия, позволивших открыть гигантские месторождения углеводородов, перспективы развития сейсмических методов зондирования сомнений не вызывали: в развитие сейсмоакустических методов зондирования начали вкладываться средства нефтегазовых компаний.

Иная ситуация сложилась с развитием электромагнитных методов зондирования. Если для сейсмических волн затухание при распространении убывает с ростом плотности среды, а проводимость на это не влияет, то для электромагнитных волн затухание определяется в первую очередь проводимостью среды распространения. Разная физическая природа сейсмических и электромагнитных волн позволяет рассматривать оба метода как взаимодополняющие. В природных горных породах проводимость и обратная ей величина - удельное сопротивление, очень часто связаны с плотностью среды, от которой зависит и коэффициент акустической жёсткости, и это позволяет использовать оба физически независимых метода в геологоразведке для всестороннего описания исследуемой среды. До создания объективных предпосылок для развития электромагнитных методов, разведочная геофизика больших глубин развивалась с опорой, прежде всего, на сейсморазведку и электромагнитные методы привлекались в сравнительно малых объёмах. Важным преимуществом сейсморазведки был созданный для систем подводной связи мощный компактный контролируемый источник, параметры которого были хорошо известны исследователям, и это существенно облегчало решение обратной задачи. Электромагнитные волны сильно затухают из-за низкого удельного сопротивления в плотной земной коре и особенно сильно в морской воде. Использование магнитотеллурического зондирования (МТЗ) ограничивалось неизвестностью параметров источника излучений и низким пространственным разрешением, а индукционные электромагнитные методы были весьма трудоёмки и не обеспечивали необходимые для практического использования глубину зондирования и разрешающую способность. Это привело к тому, что методу электромагнитного зондирования в геологоразведке была отведена роль технологии второго плана. Для практически эффективного электромагнитного зондирования земной коры были нужны мощные контролируемые источники электромагнитного поля, перекрывающие весь интересующий диапазон частот. Для зондирования на значительную глубину, позволяющую сопоставлять результаты с данными сейсмического зондирования, требовалось решить техническую задачу излучения электромагнитных волн в низкочастотном диапазоне  $10^{-1}$ - $10^3$  герц. При этом мощность излучённой волны на определённой частоте существенно меньше, чем 1 ватт на 1 мегаватт подводимой к излучателю мощности, даже при линейных размерах передающей антенны в километры и десятки километров. Тем не менее, прогресс в

электронике, создании цифровых систем обработки информации и потребность обеспечения гарантированной, пусть даже односторонней связью, подводные объекты на большой глубине позволили удовлетворительно решить значительную часть технологических проблем и создать эффективные системы низкочастотного электромагнитного зондирования с контролируемым источником даже для океанских акваторий. Параллельно быстрыми темпами развивались исследования в высокочастотной части электромагнитного спектра  $10^6$ - $10^9$  герц. В этом диапазоне частот, в последнее десятилетие также достигнуты практически важные результаты при проведении зондирования с земной поверхности и поверхности пресноводных водоёмов.

#### **Низкочастотное электромагнитное зондирование с контролируемым источником.**

В 2009 году была опубликована обзорная работа большого интернационального коллектива авторов [1] в которой подводятся итоги длительной серии экспериментов по обнаружению залежей углеводородов на дне Атлантического океана у берегов Бразилии и Гренландии, а также в Мексиканском заливе. При этом использовались методы электромагнитного зондирования как на природных полях частотой  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  герц (МТЗ) так и с использованием контролируемого источника, погружённого в морскую воду. В процессе проведения экспериментальных работ было подтверждено, что МТЗ эффективно при моделировании геологического строения и литологии в масштабах бассейна, но отличается низкой эффективностью при обнаружении продуктивных пластов (их толщина должна составлять не менее 5% от глубины залегания). Для повышения разрешающей способности метода электромагнитного зондирования было предложено использование контролируемого источника большой мощности (50 кВт), излучавшего сравнительно узкий набор частот и их основных гармоник с помощью дипольной антенны с нейтральной плавучестью длиной 300 метров, перемещающейся над дном океана на расстоянии 50-100 метров. При этом глубина акватории в местах обследования часто существенно превышала километр, а глубина зондирования под дном могла превышать 2-3 км. Это по существу, из-за сильного затухания электромагнитных волн в морской воде, определяло эффективную верхнюю границу частот МТЗ как 1 герц, а работа с контролируемым источником ограничивалась полосой частот 5 герц. Состав и геометрия зондирующего сигнала в процессе экспериментов подбирались так, чтобы он обеспечивал наилучшую чувствительность метода для обнаружения маломощного пласта, находящегося в определённом предполагаемом месте и имеющего величину сопротивления, контрастирующую с сопротивлением окружающих пласт горных пород.

Использование контролируемого источника позволило создать картину контраста удельных сопротивлений на границе высокоомного порового флюида и проводящей горной породы в масштабах залежи, поскольку имеет существенно более высокую разрешающую способность, чем в МТЗ, и поскольку параметры и местоположение источника электромагнитных волн точно известны, а более высокие частоты, доминируют в спектре зондирующего сигнала. Оба фактора значительно облегчают решение обратной задачи. Используя данные гравиметрической и сейсмической разведок, а потом и МТЗ, экспериментаторы так планировали работу с контролируемым источником, чтобы минимизировать риски при бурении разведочных скважин. Результаты применения современных технологий электромагнитного зондирования в последние 5-10 лет существенно изменили представление об их месте среди других геофизических методов. Существенная экономия ресурсов при бурении

разведочных и промысловых скважин, полученная от применения, в дополнение к сейсмическим и гравиметрическим методам, электромагнитного зондирования с контролируемым источником, заставила компании значительно увеличить вложения в развитие этой технологии. Чего стоит только факт применения в одном из морских исследований в 2007 г. такого количества приёмников электромагнитного излучения, в т.ч. донных, которое превышает их количество, использованное всеми странами во всех предшествующих экспериментах. Работа с буксируемым контролируемым источником низкочастотных излучений открывает принципиально новые возможности применения электромагнитного зондирования при первичном геофизическом обследовании предшествующему бурению разведочных скважин. Практически эта технология стала вровень с технологией сейсмического зондирования на акваториях и применяется по результатам сейсморазведки для уточнения границ локального расположения продуктивных пластов в пределах залежи, обеспечивая уточнёнными данными буровиков.

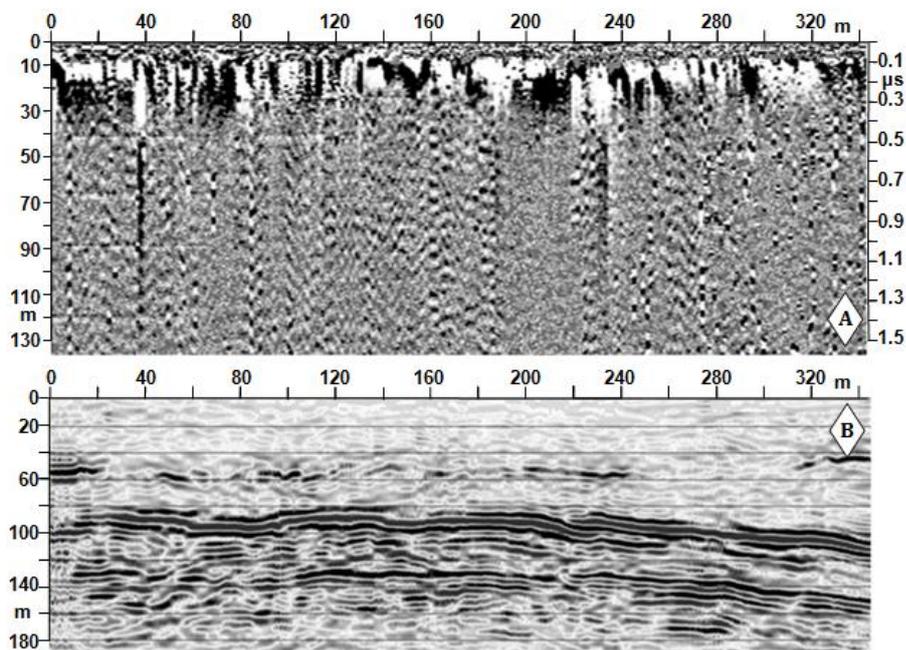
### **Высокочастотное электромагнитное зондирование с контролируемым источником.**

Параллельно с глубоководными низкочастотными электромагнитными исследованиями развивались технологии исследования верхней части разреза (ВЧР). Быстро развивались и новые технологии зондирования, основанные на принципе георадиолокации границ раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью [2,3], и традиционные технологии зондирования на переходных процессах с использованием петли с током [4].

Из всех методов электромагнитного зондирования, для исследования ВЧР на сегодняшний день наиболее эффективным по критерию глубина зондирования-разрешающая способность-стоимость бита информации является метод георадиолокации [3]. Этот метод быстро прогрессирует последние десятилетия вместе с прогрессом электронной элементной базы и методами цифровой обработки информации. Динамический диапазон моноимпульсных, сверхширокополосных, наносекундных, мегаваттных георадаров ГРОТ за 20 лет увеличился на десятки децибел, а практическая глубина зондирования увеличилась более чем в 10 раз.

Электромагнитное зондирование, особенно океанских акваторий, не дешёвое удовольствие. Почему такие компании как Шлюмберже из всех геофизических технологий, в последние годы особый акцент делают на развитие технологий электромагнитного зондирования, особенно когда речь идёт об их использовании применительно к разведке и эксплуатации месторождений углеводородов? Сравнение диагностических особенностей, характерных для сейсмических и электромагнитных методов в применении к углеводородам даёт ответ на этот вопрос. На рис.1 при сравнении первичных записей георадиолокационного и сейсмического зондирования видно, что георадиолокация (верхняя часть рисунка) информативнее примерно до 100-150 метров, а сейсморазведка - на больших глубинах. Работа проводилась на разведочных площадях компании X-Strata [5]. По одному и тому же профилю прошли весной 2010 г. две группы: американская, с аппаратурой высокочастотного сейсмического и российская, с аппаратурой радиолокационного зондирования. Основной задачей этой работы было обнаружение границы слоя прочных базальтовых пород, перекрывающих угольные пласты и существенно усложняющих их открытую разработку и прослеживание влияния разломов, идущих с поверхности на структуру угольных пластов. Результаты совместной обработки данных выявили высокое качественное совпадение результатов применения обоих методов на тех глубинах, где

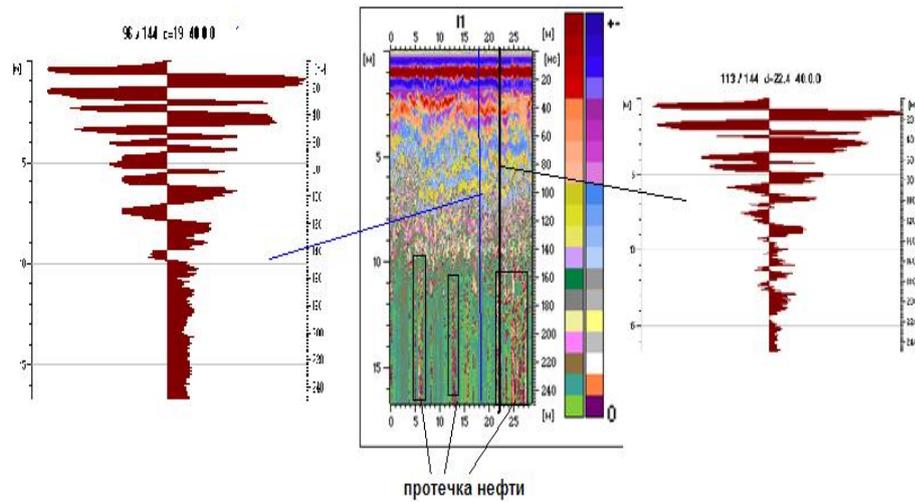
были получены достоверные результаты. Этот пример наглядно иллюстрирует сравнительную эффективность и возможности применения этих методов исследования среды.



**Рис. 1. Сопоставление результатов георадиолокации и сейсмозондирования: (А) - радарограмма профиля, полученная с использованием ГРОТ-12, (В) - сейсмограмма; верхняя шкала - расстояние от начальной точки профилирования, правая – глубина, левая – временные задержки отраженного электромагнитного сигнала.**

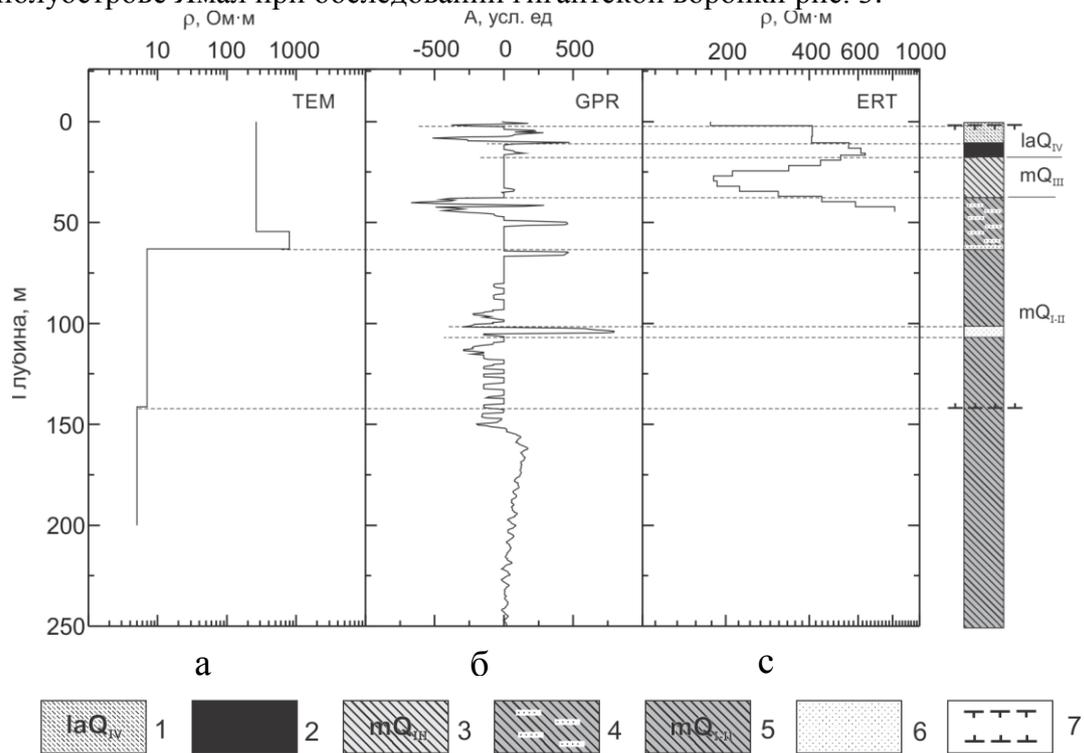
Важным преимуществом электромагнитных методов для геологоразведки является высокий контраст границы нефть-вода, слабо контрастный для сейсмических методов, потому что диэлектрическая проницаемость для нефти и воды отличается более чем в 10 раз, а коэффициент акустической жёсткости на проценты.

На рис. 2. показано, как резко меняется внешний вид зондирующего сигнала при переходе границы нефть-вода в ВЧР, образовавшейся в результате протечки нефти из хранилища. На левой части диаграммы видно влияние сильной проводимости из-за сильного увлажнения грунта, приводящей к смещению сигнала относительно нулевого порогового значения [2]. Аналогичный эффект хорошо известен в электроразведке, работающей в низкочастотном диапазоне, и проявляется в георадарных наблюдениях, когда проводимость велика и условия приближения уравнения теплопроводности выполняются для характерных времен порядка сотен наносекунд. Высокая контрастность границы раздела содержащих углеводороды и влагонасыщенных грунтов одна из основных причин быстро расширяющегося применения технологий электромагнитного зондирования в мониторинге загрязнений углеводородов. Эта технология с успехом может быть применена и в геологоразведке углеводородов.



**Рис.2. Исследование движения границы раздела нефть-вода в ВЧР. Волновые формы сигнала, соответствующие зоне протечки нефти (справа) и без загрязнения (слева).**

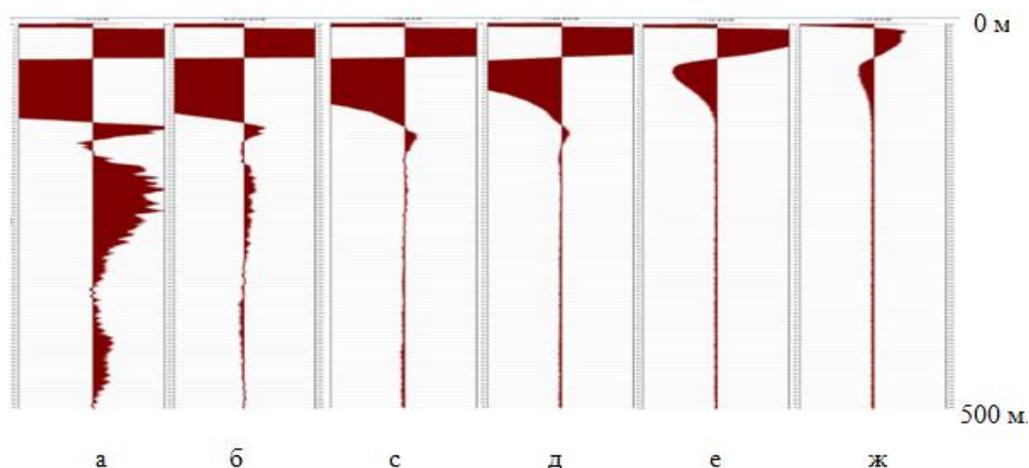
Сопоставление данных георадиолокации, полученных с помощью георадаров ГРОТ 12, ГРОТ 12Н и электроразведки рассмотрим на примере работы, выполненной на полуострове Ямал при обследовании гигантской воронки рис. 3.



**Рис. 3. Сравнение методов электроразведки (а- становление поля, с- метод электротомографии) и георадиолокации (б). 1-супесь озерно-аллювиальная, 2-лед, 3- суглинки морские, 4- суглинки с прослоями песка пылеватого, газогидратные, 5- суглинки морские слабо- и среднесоленные, 6- песок пылеватый, 7- граница ММТ.**

Из рис.3. следует, что данные, полученные с помощью георадиолокации георадарами ГРОТ 12, позволяют объединить данные электроразведки, полученные методом становления поля (ЗСБ) и методом электротомографии (ЕРТ). При этом видно, что разрешающая способность георадиолокации намного выше.

Следует отметить, что серийно выпускаемые георадары ГРОТ, весом не более 5 кг вместе с антеннами длиной от 0.3 до 10 метров, блоками питания и аккумуляторами, оснащённые передатчиками, излучающими наносекундные импульсы мощностью 1 и более мегаватт, позволяют уверенно зондировать практически любые горные породы и пресноводные водоёмы на глубину более 100 метров. Предельная глубина зондирования, достигнутая на тяжёлых подмосковных глинах, при проведении технологического эксперимента со специально изготовленными излучателями и антеннами близка к 500 метрам (рис.4) [6].



**Рис.4. Волновая форма принимаемого сигнала при разных ослаблениях мощности для передатчика 50 кВ и антеннах длиной 30 метров на глинистых грунтах Подмосковья. При неизменной мощности передатчика, чувствительность приёмника снижалась на 10 дБ от кадра «а», до кадра «ж». Очевидно, что глубина зондирования и информативность отражённого сигнала определяется, кроме мощности передатчика и длины антенн, низким уровнем собственных шумов и чувствительностью приёмного устройства.**

Выводы.

Низкочастотное электромагнитное зондирование с контролируемым источником позволяет уточнять границы залежей углеводородов на глубине в несколько километров, как на суше, так и на морских акваториях.

Высокочастотная георадиолокация позволяет исследовать ВЧР до 100 и более метров, разделяя слои даже с невысоким контрастом диэлектрической проницаемости и с высокой точностью регистрируя границы раздела.

*Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН В.В. Оленченко за предоставленные данные ЗСБ и ЕРТ.*

### Литература

1. Electromagnetic sounding for Hydrocarbons, Oilfield Review, Spring, 2009, 21, no. 1, pp. 4-23.
2. Л. Волкомирская, О. Гулевич, Е. Руденчик, Георадиолокация в средах с дисперсией. Зависимость амплитуды и формы импульса георадара от дисперсии среды, Из-во LAP(Lambert Academic Publishing) 2013г. 81стр. ISBN 978-3-659-35367-3

3. Волкомирская Л.Б. и др. Способ радиолокационного зондирования подстилающей поверхности и устройство для его осуществления. Патент на изобретение, №2490672 от 20.08.2013г.
4. Near-Surface Electromagnetic Surveying, Oilfield Review, Spring, 2009, 21, no. 1, pp. 24-31.
5. Волкомирская Л.Б. и др., Определение трещиноватости горных пород с использованием георадиолокационного зондирования с земной поверхности и из шахты. \\Physics of Wave Phenomena, 2015, Vol.22, No. 1,
6. Volkomirskaya L., Varenkov V., Reznikov A., Sahterov V. Experimental investigation of the dependence of transmitter power and antenna efficiency at a deep GPR studies. UWBUSIS'12 ,17-21September, Proceedings pp.117-119