

СЕЙСМОПРИЕМНИКИ: ИСТОРИЯ ТОЛЬКО НАЧИНАЕТСЯ

С.М. Крылатков, В.И. Бондарев, УГГГА, г. Екатеринбург

Первым приемным элементом сейсморегистрирующего тракта является сейсμοприемник - устройство, способное воспринять механические колебания среды и выработать достаточный для регистрации электрический сигнал, адекватный этим механическим колебаниям. От надежной работы сейсμοприемников решающим образом зависит качество получаемых итоговых материалов всех сейсморазведочных работ. Ежегодно в России около 200 сейсморазведочных отрядов, работающих по технологиям 2D и 3D, на сейсморазведочных профилях расставляют около 1,5 - 2 млн. сейсμοприемников. Только для ежегодного восполнения их естественной убыли в силу физического старения при 3 - 5 летнем сроке службы необходимо производство около 300 тыс. штук сейсμοприемников. Отдельные сейсмические партии с мультиканальными системами наблюдений, высоким числом каналов (4 000 и более) и большими группами (например, по 12 приемников) имеют весьма значительные сложности в обращении с огромными массивами сейсμοприемников (порядка 50-100 тысяч). Дополнительно усугубляет эти технические проблемы возрастающий интерес к многокомпонентной регистрации.

А ведь история сейсμοприемников пачиналась еще до возникновения сейсморазведки...

Проборазом современных сейсμοприемников был специальный прибор для записи сейсмологической информации о землетрясениях - сейсμοграф, появившийся в конце XIX века.

На рубеже XIX - XX вв. появляются сейсμοграфы для записи вертикальных смещений почвы с фотоэлектрической регистрацией, а в 1903 году российский академик Б.Б. Голицын создает сейсμοграф уже с гальванической регистрацией, который являлся одной из лучших конструкций данного типа (рис.1) [2].

В дальнейшем сейсмографы непрерывно и многократно улучшались и совершенствовались. Многие из них являлись прототипами для первых сейсμοприемников - новых приборов, которые создавались в начале прошлого века для разведочных целей, а некоторые непосредственно использовались в сейсморазведке. В 1914 году Л.Минтроп получил германский патент на механический сейсмограф "Сейсмос" (рис.2) [5], который стал применяться в сейсморазведке

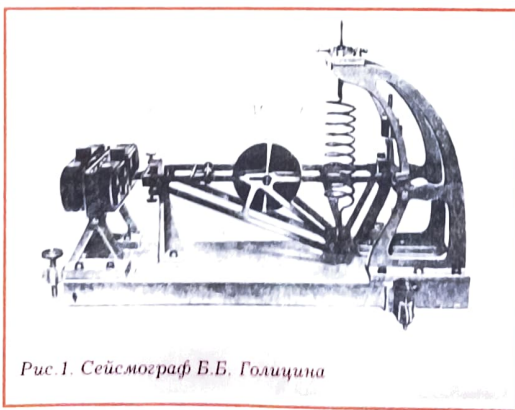


Рис. 1. Сейсмограф Б.Б. Голицына



Рис. 2. Сейсмограф Л. Минтропа

методом преломленных волн. Уже в 1925 году фирма «Джеофизикал рисерч корпорейшн» (Амерада, Карчер, Фессенден) сконструировала электрический сейсмограф электромагнитного типа - более чувствительный, чем механический сейсмограф «Сейсмос» [7]. Однако еще довольно длительное время в сейсморазведке находили применение именно механические сейсмографы Минтропа и Швейдара. В частности, при проведении сейсмической разведки МПВ в СССР в тридцатые годы широко использовался механический сейсмограф Швейдара.

И все-таки эра механических сейсмографов в сейсморазведке уходила в прошлое. Основную роль начинают играть магнитоэлектрические сейсμοприемники. На первом этапе их создания были опробованы самые различные физические принципы преобразования механических колебаний в электрические сигналы. Первые сейсμοприемники были в основном электромагнитного или электродинамического типа. В приемниках электромагнитного типа в поле постоянного магнита могла перемещаться катушка с магнитным сердечником и использовалось масляное или воздушное затухание. В приемниках электродинамического типа в поле постоянного магнита, соединенного с корпусом, передвигалась только легкая катушка и начинал использоваться электромагнитное затухание. Постепенно с появлением более качественных магнитных материалов повышалась чувствительность магнитоэлектрических сейсμοприемников и одновременно уменьшался их вес (с 1,5-2 кг в конце 40-х гг. прошлого века до приблизительно 0,1 кг в конце века) [1].

В конце 30-х гг. в СССР под руководством проф. Г.А. Гамбурцева создаются первые отечественные сейсμοприемники: сначала микрофонного (СМ-4, СМ-5), а затем и электромагнитного типа с масляным и воздушным затуханием. На их основе уже в послевоенные годы в Советском Союзе были начаты разработки сейсμοприемников, как для полевых работ, так и

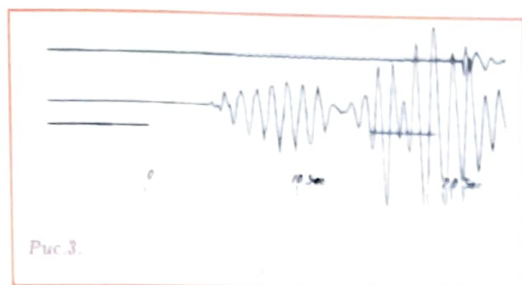


Рис.3.

для сейсмических скважинных наблюдений. В это время Л.К. Шведчиков разрабатывает конструкцию сейсмоприемников электромагнитного типа СП-47 и СП-48. На основе этих приемников были созданы скважинные сейсмоприемники СИС-47 и СИС-49. В начале 50-х гг. Шведчиков же конструирует сейсмоприемники электродинамического типа (СПЭД-52 и СЭДС). По весовым характеристикам и габаритам, к сожалению, они почти не отличались от СП-48. Несколько позже Ленинградский завод "Геологоразведка" разработал сейсмоприемники серии СП-15, СПМ-15, СП-16, СПМ-16 (автор Королев В.М.), имеющие существенно меньший вес, небольшие размеры, систему электромагнитного затухания и чрезвычайно простое устройство. В эти же годы был начат выпуск сейсмоприемников типа СПЭД-5, имевший сравнительно малые габариты и придававшийся к переносным сейсморазведочным станциям типа СС-24П. Был разработан приемник СПЭН-1, который имел низкую собственную частоту 10 Гц и предназначался для проведения работ методом КМПВ. Внешний вид некоторых сейсмоприемников этого периода показан на рис.4.

Начиная с конца шестидесятих годов прошлого века преобладающим типом сейсмоприемников (для работ на суше) стали сейсмоприемники электродинамического типа, в которых преобразование механических колебаний в электрические происходит в результате явления индукции при движении катушки между полюсами магнитов в зазоре постоянной величины.

В это время основными целями совершенствования сейсмоприемников стало уменьшение их веса и повышение надежности работы. Особенно актуальной была задача снижения веса, поскольку в сейсморазведке начался переход от применения метода КМПВ к конвейерным технологиям МОВ и МОВ-ОГТ с обязательным применением группирования сейсмоприемников. Это заставляло использовать на профиле одновременно большое количество сейсмоприемников, что непременно требовало их миниатюризации. В это время отечественная промышленность выпуска-



Рис.4. Отечественные сейсмоприемники 50-х, 60-х годов 20 века

ла сейсмоприемники для регистрации вертикальных компонент поля H и E и для регистрации горизонтальных компонент E и H .

Для получения информации о полном векторе смещения грунта создаются трехкомпонентные сейсмоприемники. Такой сейсмоприемник состоит либо из объединенных в одном корпусе одного вертикального и двух горизонтальных сейсмоприемников, либо трех отдельных приемников, оси наибольшей чувствительности которых взаимно перпендикулярны и наклонены под углом 45° к горизонту.

При проведении интегрального сейсмического картирования или вертикального сейсмического профилирования начинают применять термостойкие, а также приспособленные работать в условиях высоких давлений одно- или трехкомпонентные электродинамические сейсмоприемники, которые размещаются в специальном герметизированном корпусе скважинного фонда. Трехкомпонентные сейсмоприемники могут размещаться в самоориентирующемся карданном подвесе.

Вплоть до начала 90-х гг. в Советском Союзе на заводах в г. Барнауле, Баку и Афе выпускался широкий спектр сейсмоприемников для работ по методам МОВ, КМПВ, ГСЗ и скважинных работ.

Завоевав сушу, сейсмоприемники опустились в воду. При морских сейсморазведочных работах применяются сейсмоприемники, построенные на ином, чем электромагнитная индукция, принципе преобразования механической энергии в электрическую. Используется, так называемый, пьезоэлектрический эффект. Если к керамическому элементу из титаната бария приложить внешнее давление, то между гранями, к которым оно приложено, возникает э.д.с., пропорциональная приложенному давлению. Такие сейсмические датчики имеют малые размеры 2-3 см и вес до 100 г. Пьезоэлектрические приемники помещают в хлорвиниловый шланг - косу (стример) сечением 40-50 мм, заполняемый специальной жидкостью для придания почти нейтральной плавучести. Возможность непрерывной буксировки судном такой косы на некоторой глубине под водой и приема на ходу сейсмических колебаний позволяет достичь огромной производительности сейсморазведочных работ на море. В другой модификации, когда работы проводятся на дне моря (OBC - ocean bottom cable), используют специальные приемники электродинамического типа, рассчитанные на работу в воде при давлении соответствующем глубинам в 200-300 м, вместе с датчиками давления - гидрофонами в одном корпусе.

В последние 10-15 лет внимание разработчиков сейсмоприемников было уделено таким важным элементам сейсмоприемника, как разъемы или соединители для подключения, как одиночного сейсмоприемника, так и их группы к сейсмической косе. Если использовались ранее разъемы представляли собой простейшие по конструкции пружины, зажимы, клипсы и т.п., то в настоящее время сложилась определенная унифицированная система герметичных соединительных устройств, входящих в состав так называемых сейсмических аксессуаров.

Для достижения надежности сейсмоприемников на заводах производителей сейсмического оборудования перед отгрузкой с предприятия проводятся испытания каждого сейсмоприемника на соответствие техническим спецификациям.

В 90-е гг. на XX века в отечественную сейсморазведку интенсивно внедряются западные

И СНОВА О СЕЙСМОПРИЕМНИКАХ...
МОИ УНИВЕРСИТЕТЫ!

технологии. В связи с этим на базе одного из крупнейших заводов России по производству сейсмической аппаратуры в г. Уфе в 1990 году создается Российско-американско-японское совместное предприятие "ОЙО-Гео Импульс". На нем налажен лицензионный выпуск ряда моделей сейсμοприемников в количествах, обеспечивающих потребности внутреннего и, частично, западного рынка.

Кроме сейсμοприемников названного выше отечественного предприятия, в России применение находят аналогичные приборы производства китайских и других производителей. Несколько китайских фирм выпускают значительное количество (больше миллиона в год) сейсμοприемников, обладающих примерно такими же параметрами и эксплуатационными характеристиками, как и сейсμοприемники, выпускаемые в России. Для завоевания российского рынка эти фирмы идут на продажу своей продукции в России по демпинговым ценам (в конце 2006 года - около 6 долларов за приемник китайского производства вместо 15-20 долларов за приемник отечественного завода). Подобная политика зарубежных фирм приводит к ослаблению позиций отечественного производства и его вытеснению с рынка сейсмического оборудования.

Пройден более чем восьмидесятилетний путь развития. Сегодня мир приемников сейсмических колебаний находится в таком состоянии, когда классические электродинамические сейсμοприемники, завоевав и надежно обосновавшись в отрасли, практически достигли пределов своего совершенствования. Они имеют оптимальную массу и параметры (при полевых работах особенно в тяжелых климатических условиях бессмысленно уменьшение приемника до размеров наперстка) и дальнейшее усовершенствование их происходит главным образом в области надежности, приспособленности к работе в экстремальных условиях окружающей среды.

В связи с обсуждением истории развития сейсмических приемников, вспомним тех, кто разрабатывал теорию этих устройств. Основы теории сейсμοприемников были заложены Е. Вихертом в 1903 году. В 1912 году Б.Б. Голицын составил дифференциальное уравнение движения вертикального сейсмографа. Г.А. Гамбурцев в 1937 году рассмотрел теорию сейсмографа возвратно-поступательного типа и применил при анализе работы сейсμοприемников метод аналогий. Свой вклад в последующее развитие теории сейсμοприемников внесли наши соотечественники М.К. Полшков, А.И. Слуцковский, Л.К. Шведчиков, Д.П. Киринос, И.И. Гурвич, В.А. Рыжов и др.

В основных чертах теорию сейсμοприемника изложена в статье А.В. Стакло (стр 9).

Механическая часть принципиально одинакова у всех типов приемников инерционного действия. Главные различия в сейсμοприемниках заключаются в принципах преобразования механического движения в электрический сигнал. Поэтому обычно сейсμοприемники классифицируют по типу электромеханического преобразователя.

Следует заметить, что при сейсморазведочных работах с существующими источниками колебаний обычный электродинамический сейсμοприемник реагирует на сложную комбинацию всех трех характеристик колебательного процесса.

Величина возникающей э.д.с. поэтому всегда

пропорциональна смещению, скорости смещения или ускорению чувствительной массы. Коэффициент пропорциональности при этом получил название коэффициент электромеханической связи (КЭМС). В зарубежной литературе его нередко заменяют близким понятием - чувствительность сейсμοприемника. Однако, в строгом смысле слова, это не совсем эквивалентные понятия. Для электродинамических сейсμοприемников чувствительность измеряется величиной напряжения (В), генерируемого сейсμοприемником при скорости движения корпуса прибора в 1 м/с.

У приемников электродинамического типа электромеханический преобразователь работает на основе явления индукции. В катушке, движущейся в магнитном поле, возникает э.д.с., которая зависит от скорости изменения магнитного потока.

Для датчиков на основе MEMS в электрическом преобразователе емкостного типа вырабатывается изменение напряжения, пропорциональное изменению емкости или смещения. Пульсации емкости и напряжения приблизительно связаны таким соотношением

$$dU = -\frac{U}{C} \cdot dC = -\frac{U}{d} \cdot dx$$

Однако при наличии утечек, напряжение меняется по более сложному закону

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U}{d} \cdot \dot{x} - \frac{U}{\tau}$$

Здесь τ - постоянная времени электрической системы.

Можно показать, что при малом τ амплитудно-частотная характеристика этого преобразователя представляет собой функцию:

$$|E_{MEMS}(\omega)| = \left| \frac{U(\omega)}{x(\omega)} \right| = \frac{G}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega \cdot \tau)^2}}}$$

Следует особо отметить, что физические принципы и теория таких преобразователей были описаны Г.А. Гамбурцевым еще в середине 30-х гг. прошлого века [2]. Так как в MEMS датчиках собственная частота колебаний механической системы много выше частоты измеряемых волн, то основная чувствительность их лежит в области ускорений. Общая амплитудно-частотная характеристика датчика на основе MEMS дается выражением:

$$|S(\omega)| = |A_z(\omega)| \cdot |E_{MEMS}(\omega)|$$

График ее показан на рис. 5. При небольшом τ характеристика становится почти постоянной, начиная с очень низких частот до частоты резонанса, которая составляет сотни Гц.

Для пьезоэлектрических датчиков электрический преобразователь вырабатывает э.д.с. пропорциональную приложенному давлению P .

$$E = G \cdot P$$

Величины давление на глубине H нахождения приемника в воде и скорости смещения частиц жидкости под действием сейсмической волны на поверхности моря связаны для гармонических колебаний на каждой частоте соотношением:

$$\frac{A_p(\omega)|_H}{A_s(\omega)|_0} = V_p \cdot \rho \cdot \sin\left(\frac{\omega}{V_p} \cdot H\right)$$

Если подобрать глубину нахождения пьезоприемников в воде, такую, чтобы $\omega V_p H = \pi/2$, то тогда амплитуды измеряемых приемником давлений будут пропорциональны амплитудам скоростей смещений частиц воды на поверхности моря [4].

История развития техники знает множество примеров, когда усовершенствование какого-либо устройства или создание устройства такого же как и ранее назначения на новых принципах, обещает вначале революционные изменения в развитии отрасли, но, в конечном счете, не выдерживает борьбы с уже существующим, надежным и привычным. Причин этому множество, здесь может сыграть свою роль своевременность, технологичность, простота в изготовлении и использовании, а также не в последнюю очередь экономическая целесообразность. Но есть и много примеров другого рода, когда такое изобретение быстро и прочно завоевывает технологическое пространство и расширяет его новыми областями применения.

Сегодня в области приема сейсмических колебаний происходит подобного рода революция.

Ее основы закладывались более полувека назад.

Уже начиная с 50-х гг. XX века, в ряде стран проводятся разработки, связанные с возможностью применения датчиков, построенных на основе так называемых MEMS-устройств (MEMS-MicroElectroMechanical Systems), в частности для регистрации механических колебаний. Результатом таких работ явилось то, что на рубеже нового тысячелетия крупнейшие фирмы-производители геофизической техники предложили на рынки сейсмического оборудования новые сейсмоприемники VectorSeis (фирма Input-Output) и DSU (фирма CGG) на основе MEMS-датчиков и новые технологии получения данных с использованием этих приемников.

Сегодня под термином MEMS понимают микроустройства самой разнообразной конструкции и назначения, в производстве которых используются технологические приемы микроэлектроники (нанотехнологии). Микроэлектромеханические системы получают путем комбинирования механических элементов, датчиков и электроники на общем кремниевом основании посредством технологий микропроизводства.

MEMS возникла не на ровном месте. Фактически она эволюционировала параллельно полупроводниковой технологии. Во второй

половине 40-х годов прошлого столетия уже была открыта основа ключевых технологических процессов для создания MEMS-устройств и современных полупроводниковых приборов - анизотропное травление кремния. В современной MEMS-технологии этот прием позволяет получать "отсоединенные" от подложки (полупроводникового кристалла, на котором реализуется устройство) микродетали за счет предварительного формирования и последующего удаления травлением специальных "жертвенных" слоев.

Области применения MEMS-устройств постоянно увеличиваются. Это и техника сверхвысокочастотной связи (оснащенные Bluetooth персональные компьютеры, мобильные телефоны) и разнообразные датчики. В современных накопителях на жестких магнитных дисках акселерометры на основе MEMS выполняют микрокоррекцию положения магнитной головки, увеличивая точность ее позиционирования, что позволяет достичь более высокой плотности записи. MEMS-устройства применяются в печатающих головках струйного принтера, в DLP-проекторах. Одним из первых применений MEMS-технологий, получивших повсеместное распространение, стали датчики ускорения (акселерометры), устанавливаемые сейчас практически во все современные автомобили для выработки сигнала о столкновении и срабатывания системы защитных воздушных подушек.

Типичный современный MEMS-акселерометр представляет собой микроструктуру, напоминающую пластину, которая подвешена на пружинах относительно основания. Изменение приложенного к датчику силы (его ускоренное движение) приводит к смещению пластины и отражается на величине электрической емкости этого элемента. Изменение электрической емкости устройства приводит к изменению разности потенциалов в цепи датчика.

В новых сейсмоприемниках выполнено объединение датчика ускорения, созданного на основе MEMS, который является аналоговым датчиком, с цифровым дельта-сигма преобразователем (ASIC) в одном корпусе. По этой причине такой сейсмоприемник по весу, габаритам и цене стал сравнимым с полевым одноканальным модулем современных телеметрических сейсмических систем, работающих с аналоговыми электродинамическими сейсмоприемниками.

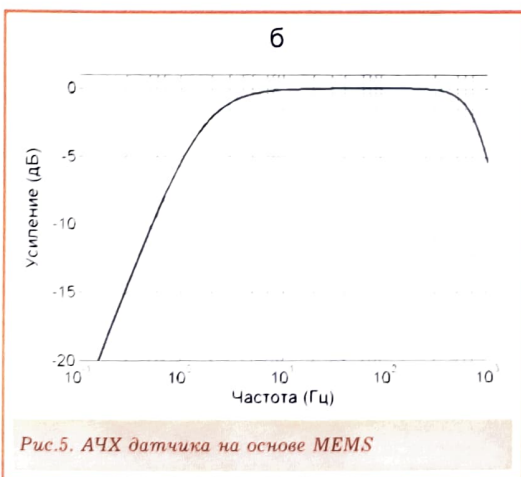
Важными преимуществами нового типа приемников, в сравнении с современными электродинамическими сейсмоприемниками, являются линейность их амплитудной и фазовой частотных характеристик в диапазоне частот от долей герца до несколько сотен герц. Датчики обладают низким суммарным коэффициентом гармоник ($<0.0001\%$), очень высокой прочностью - обеспечивается функционирование при тряске, соответствующей ускорениям в сотни и тысячи единиц g. По сравнению с электродинамическими сейсмоприемниками они обладают улучшенной стабильностью параметров во времени, а также при изменении температуры. Обеспечивается широкий температурный диапазон нормального функционирования (от -40 to 85°C).

Новые сейсмоприемники оказались малочувствительными к углу наклона своей оси к горизонту. В значительной мере они избавлены от влияния электрических наводок, утечек и др [3, 6].

Все сказанное позволяет считать такие сейсмоприемники весьма перспективными для использования в сейсмоземлетрясениях.

Однако есть и минусы. Произошло некоторое уменьшение динамического диапазона регистрации до 120-130 дБ за счет повышенных собствен-

И СНОВА О СЕЙСМОПРИЕМНИКАХ... МОИ УНИВЕРСИТЕТЫ



ных шумов датчика.

Условно можно отнести к недостаткам сейсμοприемников такого типа их относительно большой вес (400-600 г), необходимость подключения к источникам электроэнергии, необходимость в ориентации по азимуту (для трехкомпонентных датчиков). Однако вес и потребление энергии не больше, чем в аналоговый приемник — одноканальный полевой модуль. Ориентации по азимуту всегда требуется для трехкомпонентных приемников. Кроме того, в новых приемниках допускается и упрощенный вариант ориентации указателем по профилю.

Существенно важнее представляется такой недостаток MEMS-приемников как возможность только одиночного их использования, так как принципиально отвергается технология группирования. Нельзя складывать электрически коды, которые вырабатываются каждым приемником. Следствием может стать неспособность одиночных датчиков подавлять регулярные волны-помехи. Сегодня выходом из этого представляется уменьшение шага между каналами, что увеличивает количество приемников и приводит к удорожанию работ. Все это может создать очень острую проблему надежной регистрации отраженных волн в условиях помех. По крайней мере, для оценки качества полученных в поле сейсмограмм, на которых оператор не сможет различить полезные волны, может потребоваться экспресс-обработка. Очень значима на сегодня и существенно их более высокая стоимость (в 30-40 раз) по сравнению с аналоговыми сейсμοприемниками электродинамического типа. Скорее всего, аналоговые сейсμοприемники всегда будут ниже по стоимости, а в силу того, что они не содержат электронной части, будут более надежны в

течение длительного срока эксплуатации.

Проблем действительных и вымышленных применений новых цифровых сейсμοприемников много, однако, не исключено, что часть этих проблем носит и психологическую окраску — мы к этому еще не привыкли! Но с подобными же сомнениями входили в сейсморазведку и методы, и многие другие новшества, без которых сейчас сейсмическая разведка не может обойтись.

Акселерометры MEMS, несомненно, будут использоваться даже в условиях, когда есть довольно привлекательная альтернатива. Однако, поскольку практика получения многоволновых изображений среды будет безусловно расширяться, мы должны не забывать и о больших возможностях групп аналоговых, в том числе и трехкомпонентных сейсμοприемников. Может так случиться, что особенно выгодно может быть использование этих групп при широком применении техники беспроводной регистрации. А ведь по некоторым прогнозам уже в 2010 году 50% сейсмического оборудования станет беспроводным.

Литература

1. Бондарев В.И., 2006. Сейсморазведка. Кн. 2. Екатеринбург: Изд-во ИГиГ 278 с.
2. Гамбурцев Г.А., 1955. Основы сейсморазведки. М.: ГНТИ НТЛ 378 с.
3. Жгенти С.А., Перегудов Ю.Л., Кузнецов В.М., 2003. Многоволновая сейсморазведка. Приборы и системы разведочной геофизики. 3 с. 5-9.
4. Слущковский А.И., 1970. Сейсморазведочная аппаратура. М.: Недра. 344 с.
5. Domenico N., 1996. The Mintrop mechanical seismograph - The Leading Edge. pp. 1049-1052.
6. Mougnot D. и др., 2003. 3С Акселерометры на базе MEMS для наземной сейсмической разведки. Пришло ли их время? - Приборы и системы разведочной геофизики. 3, с.25-30.
7. Schriever W., 1952. Reflection seismograph prospecting - how it started. The Oklahoma Quarterly, University of Oklahoma Association. Vol. 1, No. 4, July 1952, pp. 27-30.



World Leader in Magnetotellurics PHOENIX GEOPHYSICS

- Многофункциональная и специализированная электроразведочная аппаратура для всех наземных ЕМ методов. Высокоточная GPS синхронизация всех приборов.
- Датчики, приёмники, генераторы, мониторинговые системы, вспомогательное оборудование.
- Полный комплект аппаратурно-технических средств и программного обеспечения для выполнения полевых измерений, обработки и интерпретации. Русифицированная документация. Сдача под ключ на объекте Заказчика.
- Централизованное обучение обслуживающего персонала и курсы повышения квалификации в России. Гарантийное сервисное обслуживание в течение трех лет



Toronto

Системы в полном комплекте для поисков, разведки, мониторинга и научных исследований

Тел: +1 416 491-7340 Факс: +1 416 491-7378 www.phoenix-geophysics.com mail@phoenix-geophysics.com