

Рассматриваются геофоны (иначе — сейсмоприёмники), в основном с метрологической точки зрения — как измерительные преобразователи механического сигнала в электрический. Параллельно обсуждаются некоторые терминологические вопросы, касающиеся геофонов.

*Щёлкни кобылку в нос —
она махнёт хвостом.
К. Прутков*

Сейсмический канал, как объект метрологического обеспечения, состоит из следующих элементов: геофон — линия связи — сейсмостанция.

Сразу немного о терминологии. В нашей литературе в основном используется термин "сейсмоприёмник", в англоязычной — seismometer, seismograph, seis, но чаще всего — geophone. Последнее время и в отечественной литературе используется краткий и точный термин "геофон". Он передаёт основной смысл понятия: и то, что исследуется Земля, и то, что исследования проводятся в звуковом диапазоне частот, что хорошо согласуется с такими терминами, как "геология", "геофизическая разведка". В морской геофизике аналогичный по назначению датчик именуется "гидрофон". Учитывая стремление гармонизировать нашу терминологию с зарубежной, далее используется термин "геофон".

Геофон является первичным аналоговым измерительным преобразователем сейсмических колебаний в электрический сигнал. В наземной сейсморазведке преимущественно используются электродинамические геофоны. Это обусловлено простотой конструкции, высокой чувствительностью, надёжностью и механической прочностью (последнее немаловажно: автор был свидетелем, как геофоны устанавливаются на плотный грунт чуть ли не с помощью кувалды!). Так как рассматриваются только геофоны этого типа, далее понятие "электродинамический" опускается. Устройство геофонов хорошо всем известно, и мы на нём останавливаться не будем. Обсуждаются только вертикальные геофоны, т. е. горизонтальные приборы ничем существенно не отличаются, за очевидным исключением иного влияния силы тяжести.

Рассмотрим преобразование геофоном механических колебаний в электрический сигнал, в основном используя физику явлений, с минимумом теории. Хотя эти явления не один раз описаны, повторим основные положения, чтобы попутно отметить некоторые немаловажные нюансы. Для определённости количественные характеристики приводятся для приборов типа СВ-10Ц.

При воздействии сейсмического сигнала на корпус геофона груз (катушка) перемещается относительно магнитной системы. В сигнальной обмотке катушки возникает ЭДС

$$e = B \cdot l \cdot v = \pi d_{\text{ср}} \omega \cdot v = K \cdot v, \quad (1)$$

где B — среднее значение магнитной индукции в зазоре,

l — общая длина проводника в обмотке,

v — скорость смещения катушки относительно корпуса,

$d_{\text{ср}}$ — средний диаметр витка,

ω — число витков обмотки,

K — коэффициент преобразования.

Таким образом, если у нас есть выражение для скорости груза, то для перехода к электрическому напряжению его достаточно умножить на коэффициент преобразования K . Поэтому далее рассматривается только скорость груза относительно корпуса геофона.

Обычно предполагается, что индукция в зазоре постоянна, но это не так. Вблизи границ полюсных наконечников поле заметно искажается. Согласно А.В. Рыжову [7], именно неоднородность магнитного поля является основным источником нелинейности геофона. Это означает, что, вообще говоря, коэффициент преобразования не является постоянным, а зависит от положения груза в магнитном зазоре. Но на практике полагают $K = \text{const}$, а нелинейность рассматривают как один из видов погрешностей.

У катушки есть электрические параметры: омическое сопротивление, индуктивности, межвитковая ёмкость. Ёмкость катушки — порядка десятков пикофард — не оказывает на работу геофона никакого заметного действия. Примерное значение индуктивности катушки для приборов типа СВ-10Ц составляет 0,06 Гн. В [9] показано, что влияние индуктивности начинает сказываться на частотах порядка 300 — 500 Гц, лежащих вне рабочей полосы геофона. Поэтому, рассматривая далее механическое воздействие на геофон, н ёмкостью, и индуктивностью обмотки пренебрежём.

Примечание. Очевидно, что при рассмотрении электрических методов исследования геофонов индуктивностью пренебрегать нельзя, но в данной статье такие методы не рассматриваются.

Составим уравнение движения геофона. И в этом несложном деле есть моменты, на которые следует обратить внимание.

Предположим, что вертикальный геофон жёстко связан с грунтом (или — в лаборатории — со столом вибростенда), движущимся с ускорением ξ . Под воздействием силы инерции груз

двигается относительно корпуса с ускорением $\ddot{x}$.

Полное ускорение груза, очевидно, равно $\ddot{x} + \xi$, если оси Ox и $O\xi$ направлены в одну сторону, и $\ddot{x} - \xi$ — если оси направлены противоположно.

Остановимся на последнем варианте. На груз действует сила упругости пружины, механическое сопротивление, направленные в сторону, противоположную смещению x , и сила тяжести, направленная по оси Ox . Следовательно, уравнение движения груза имеет вид:

$$m(\ddot{x} - \ddot{\xi}) + H\dot{x} + Cx = mg \quad (2)$$

И СНОВА О СЕЙСМОПРИЕМНИКАХ...
МОИ УНИВЕРСИТЕТЫ

где H – коэффициент сопротивления, C – коэффициент жесткости пружины.

Подчеркнем, что все члены данного уравнения представляют собой некоторые силы.

В [9] показано, как сила тяжести влияет при наклоне прибора: уменьшается выходной сигнал и в общем случае возрастает нелинейность. Так как в рабочем положении вертикального геофона сила тяжести компенсируется начальным прогибом пружины, в данной статье влияние силы тяжести не рассматривается.

Обычно переходят к удельным силам, т. е. силам, отнесенным к единице массы, и после элементарных преобразований уравнение приобретает привычный вид:

$$\ddot{x} + 2\beta_0\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \xi \quad (3)$$

где $\beta_0 = H/2\omega_0 m$ – коэффициент демпфирования,

$\omega_0 = \sqrt{C/m}$ – собственная угловая частота. На практике обычно используется циклическая собственная частота $f_0 = \omega_0/2\pi$.

И снова о терминологии. В ГОСТ 16821 [4] параметр β , характеризующий потери энергии при колебаниях, именуется "степень затухания". Однако для этого параметра ГОСТ 24346 [5] устанавливает термин "относительное демпфирование", ГОСТ 8.009 [1] – "коэффициент демпфирования", а в литературе встречаются также "коэффициент колебательности", "декремент затухания", "коэффициент затухания". В иностранных источниках обычно используется "damping factor" или просто "damping". Опять же с целью гармонизации геофизикам стоит взять термин "коэффициент демпфирования" по ГОСТ 8.009, с возможным сокращением, используя зарубежный опыт, до термина "демфирование".

Рассматривая уравнение (3), легко увидеть, что при выборе одинакового направления осей Ox и $O\xi$ в правой части появится знак минус. Но никаких существенных преимуществ для теории выбор того или иного варианта не имеет, а с учётом того, что у большинства геофонов выход симметричный, для практики разница вообще отсутствует.

Часто говорят (и автор настоящей статьи не исключение), что в правой части уравнения (3) стоит ускорение. И это справедливо во внешней системе координат. Но в системе координат, связанной с корпусом геофона мы видим только, что на груз действует некоторая сила, и уже отметили, что уравнение (2) составлено именно для сил. Оттого, что мы поделили все члены уравнения на константу m , силы не исчезли, следовательно, правая часть представляет собой удельную силу, численно равную ускорению. Важность данного замечания будет очевидна далее при изложении вопроса об электромагнитном демпфировании груза геофона.

Для анализа удобно использовать не уравнение, а передаточную функцию. Используя символический метод и представляя оператор производной $d/dt = p$, получим передаточную функцию геофона для смещения груза относительно корпуса

$$X(p) = \frac{1}{p^2 + 2\beta_0\omega_0 p + \omega_0^2} \quad (4)$$

и для скорости

$$\Phi_v(p) = \frac{p}{p^2 + 2\beta_0\omega_0 p + \omega_0^2} \quad (5)$$

Передаточные функции (4, 5) справедливы для случая, когда на входе удельная сила. В геофизике принято использовать передаточную функцию

$$U(p) = \frac{p^2}{p^2 + 2\beta_0\omega_0 p + \omega_0^2} \quad (6)$$

считая, что на входе – скорость смещения. Но точно так же, как для (5) на входе действует удельная сила, для (6) на входе не скорость, а удельный импульс силы (или удельное количество движения). Таким образом,

мы говорим "ускорение" – подразумеваем "удельная сила",

мы говорим "скорость" – подразумеваем "удельный импульс силы".

Небольшое пояснение относительно (6). Если на входе геофона не удельная сила ξ , а удельный импульс ξ , представляющий собой интеграл от удельной силы, то передаточная функция (5) справедлива не для скорости, а для смещения груза. Чтобы получить на выходе сигнал, пропорциональный скорости, следует передаточную функцию (5) умножить на оператор p .

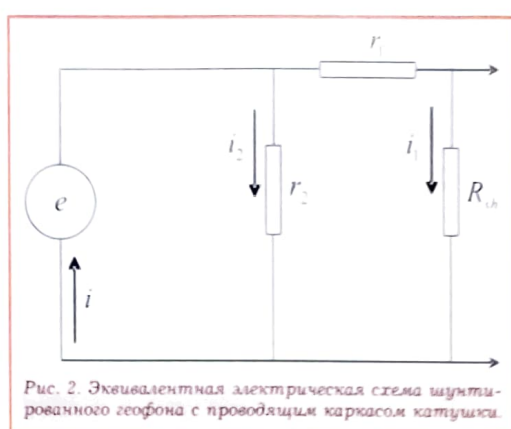
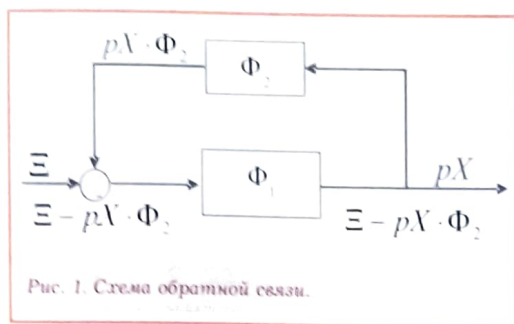
В уравнениях (2, 3) учитывается только механическое демпфирование: влияние воздуха, внутреннего трения в пружинах и т.п. Но это демпфирование невелико, коэффициент β_0 вряд ли превосходит 0,1. С целью увеличения демпфирования каркас катушки делают проводящим. В этом случае его можно рассматривать как короткозамкнутый виток, а совокупность каркаса и сигнальной обмотки – как трансформатор. В теории трансформаторов принято для упрощения всех выкладок и построения эквивалентных схем пересчитывать параметры вторичной обмотки в первичную. Мы поступим так же, пересчитав ЭДС, ток в каркасе и сопротивление каркаса в сигнальную обмотку. Для этого, очевидно, ЭДС следует умножить, ток разделить на число витков, сопротивление же каркаса умножить на квадрат числа витков сигнальной обмотки (как уже говорилось, индуктивностью мы пренебрегаем). Далее используются пересчитанные параметры и соответствующую оговорку не делается.

Сначала рассмотрим физику влияния проводящего каркаса. При движении груза относительно магнитной системы в каркасе наводится пропорциональная скорости ЭДС, равная e в уравнении (1). Под действием ЭДС в каркасе потечёт ток, который при взаимодействии с магнитным полем вызовет появление силы, препятствующей движению катушки.

Выражение для этой силы легко найти по рассматриваемым физическим процессам. Ток в каркасе $i_2 = e/r_2$, где r_2 – сопротивление каркаса. Сила, действующая на груз,

$$F_2 = K \cdot i_2 = K \cdot e / r_2 = \frac{K^2}{r_2} v \quad (7)$$

Так как эта сила пропорциональна скорости, то её воздействие равносильно увеличению демпфирования, что и требовалось получить. Используя терминологию теории автоматического регулирования (ТАР), можно сказать, что каркас вносит отрицательную обратную связь. На рис. 1 изображены прямая связь – преобразо-



вание силы в скорость груза и обратная связь — преобразование скорости груза в силу. Так как операции проводятся с символьными переменными, для их обозначения использованы прописные буквы.

Передающую функцию (а в нашем случае — просто коэффициент) обратной связи найдем из (7). Вот здесь нам и понадобится вспомнить, что мы перешли к удельным силам: коэффициент при скорости в (7) следует разделить на значение массы груза. Окончательно коэффициент обратной связи

$$\Phi_2 = \frac{K^2}{m \cdot r_2} \quad (8)$$

и передаточная функция для геофона с проводящим каркасом по известной формуле ТАР (эту формулу легко получить, используя рис. 1):

$$\Phi(p) = \frac{\Phi_1(p)}{1 + \Phi_1(p) \cdot \Phi_2} \quad (9)$$

если на входе сила, и

$$V(p) = \frac{U(p)}{1 + U(p) \cdot \Phi_2} = p \cdot \Phi(p) \quad (10)$$

если на входе импульс силы.

Точно такое же влияние оказывает и шунтирование геофона. На рис. 2 показана эквивалентная схема прибора с проводящим каркасом и шунтирующим сопротивлением R_{sh} . Очевидно, что общий ток равен $i = e/R_{sum}$, причём суммарное сопротивление равно параллельному соединению сопротивлений r_2 и $r_1 + R_{sh}$:

$$R_{sum} = \frac{(r_1 + R_{sh}) \cdot r_2}{r_1 + r_2 + R_{sh}} \quad (11)$$

Функции (8, 9) сохраняют свой вид, только в выражении для Φ_2 сопротивление r_2 надо заменить на R_{sum} . Если же рассматривать значение напряжения на выходе геофона, то надо ещё

заменить K на $K \cdot \frac{r_2 \cdot R_{sh}}{r_2 + R_{sh}}$.

В рабочей полосе частот функция (10) практически совпадает с функцией вида (6), у которой коэффициент демпфирования β_0 заменён на

$$\beta = \beta_0 + \frac{K^2}{2\omega m R_{sum}} \quad \text{где вторая составляющая}$$

обусловлена влиянием шунта и проводящего каркаса.

На рис. 3 показаны модуль и аргумент комплексной функции (10), т. е. амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики (АЧХ и ФЧХ), для шунтированного геофона с проводящим каркасом. Видно, что гармоники входного сигнала подавляются тем больше, чем ниже частота, т. е. прибор в данном случае представляет собой фильтр верхних частот.

Вообще заметим, что, вопреки мнению в [8], любое средство измерений искажает входной сигнал, и задача исследователя — выбрать средство измерений такое, чтобы искажения существенным для данного эксперимента образом не влияли на результат исследования.

В некоторых случаях возможно частичное восстановление искажённого сигнала с помощью операции, хорошо знакомой сейсморазведчикам под термином "деконволюция".

И ещё раз о терминологии. Вместо термина "деконволюция" ГОСТ 16821 [4] рекомендует не слишком удачный термин "обратная фильтрация". Встречается в литературе также термин "обратная свёртка" (т. к. в математике convolution — свёртка). По мнению автора, оба эти термина не слишком удачны. Возможно, что наилучшим является точный по смыслу термин "восстановление сигнала", широко используемый в морской гравиметрии.

Первичное назначение деконволюции — восстановление сигнала (хотя бы приближённое) после его искажения какой-либо линейной системой. Деконволюция выполняется фильтром, частотные характеристики которого обратны частотной характеристике искажающей системы, поэтому необходимы сведения о передаточной функции системы.

Построение таких фильтров не всегда возможно. Так, невозможно в принципе восстановить в сигнале частоты, которые полностью подавлены, а при восстановлении частотных составляющих, ослабленных до уровня шумов, одновременно

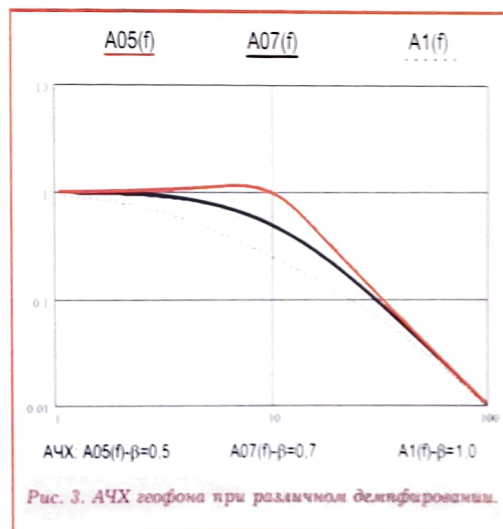


Рис. 3. АЧХ геофона при различных демпфированиях.

И СНОВА О СЕЙСМОПРИЕМНИКАХ... МОН УНИВЕРСИТЕТЫ

происходит значительное усиление дисперсии шума.

Покажем смысл деконволюции на простом примере. Предположим, что мы хотим расширить частотную характеристику геофона, показанную на рис. 3, в область низких частот и ликвидировать резонансный пик в районе собственной частоты. Предположим, что колебательное звено с желаемой частотной характеристикой фильтра Баттерворта должно иметь собственную частоту 5 Гц и коэффициент демпфирования 0,707. На рис. 4 показана страничка вычислений в Mathcad для решения этой задачи. Результирующая передаточная функция W_2 совпадает с желаемой W_1 после применения к исходной функции W корректирующего фильтра Φ^1 .

Во временной области поведение геофона описывается реакцией прибора на сигнал в виде ступени – переходной характеристикой

$$h(t) = \frac{K \cdot \omega_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \exp(-\beta \omega_0 t) \sin \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t \quad (11)$$

или реакцией на короткий импульс (δ -функцию) – импульсной переходной характеристикой

$$g(t) = K \exp(-\beta \omega_0 t) \times \left[\cos \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t - \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sin \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t \right] \quad (12)$$

Возникает вопрос, как задать, например, механический импульс. Совершенно очевидно, что нельзя, как рекомендуется в [8], “падение на поверхность (геофона) с примерно 30-сантиметровой высоты 2-мм стального шарика”. При любом импульсном воздействии на корпус геофона мы увидим высокочастотный медленно затухающий процесс, совершенно не похожий на характеристику (12). Это и не удивительно. При подаче импульса на корпус прибора возбуждаются продольные колебания именно корпуса как некоторого стержня (см. любой учебник по уравнениям математической физики). По-

видимому, единственный реальный способ избежать появления ложного колебательного процесса – возбуждать геофон электрическим импульсом, подаваемым на его клеммы.

Но и здесь не всё просто. Особых проблем не возникает, если используются аналоговые средства измерений, например, обычный осциллограф. Но сейчас везде переходят на цифровые методы, а в различных цифровых системах, в том числе и в сейсмостанциях, требуется фильтрация для исключения эффекта наложения спектров при дискретизации входного аналогового сигнала. Этот эффект носит название “alias”, а фильтр для предотвращения эффекта – “alias filter” или “antialias(ing) filter”.

Ещё немного о терминологии. В русской литературе привилось, на наш взгляд, крайне неудачное название “антиалийсинговый фильтр”, что является просто транслитерацией соответствующего английского термина (от antialiasing – подавление помех спектрального наложения). Известно, что существуют фильтры Баттерворта, Эйлера, Чебышева и т.д. Основываясь на этом, автор готов предложить для рассматриваемого фильтра, тоже основанное на имени учёного: для русофилов – “фильтр Котельникова”, для западников – “фильтр Найквиста”.

При импульсном воздействии переходный процесс фильтра Котельникова накладывается на переходный процесс геофона, существенно искажая его начальный участок. Это следует иметь в виду при расчёте параметров геофона по переходному процессу [9].

Рассмотрим такой важный для практики вопрос, как выбор геофона для решения конкретной задачи. Собственная частота определяет рабочий частотный диапазон, в котором искажениями сигнала допустимо пренебречь. Обычно в проспектах указывается, что рабочая полоса частот – от $0,5 f_0$ до $25 f_0$, поэтому очевидно, что для глубинных исследований следует брать низкочастотные геофоны, а для инженерных – высокочастотные.

Коэффициент демпфирования β можно выбирать из следующих соображений: при $\beta=0,5$ полоса геофона наиболее продвинута в область низких частот (при постоянной f_0 , при $\beta=0,707$ геофон имеет свойства фильтра Баттерворта, т.е. максимально плоскую АЧХ, при $\beta=0,8$ – ФЧХ геофона максимально линейна в области собственной частоты, при $\beta=1$ геофон перестаёт быть колебательным звеном и становится апериодическим звеном 2-го порядка с минимальной длительностью переходного процесса. Здесь следует отметить ошибку в [8], где сказано: “... сейсмоприёмник, который не имеет собственной колебательности, ... гарантирует отсутствие спектральных искажений”. К сожалению, это не так: при $\beta=1$ уже на собственной частоте искажение достигает 6 дБ. Все изложенные оценки подтверждаются практическими измерениями, так что ошибочно ещё одно утверждение в [8]: “Так сложилось, что все описанные в литературе свойства сейсмоприёмников определены не в результате измерений, а путем математической обработки различных мысленных построений”. На самом деле теория геофонов подтверждается реальными измерениями с убедительной точностью.

При значениях $\beta \approx 10$ геофоны специальной конструкции имеют уже характеристики акселе-

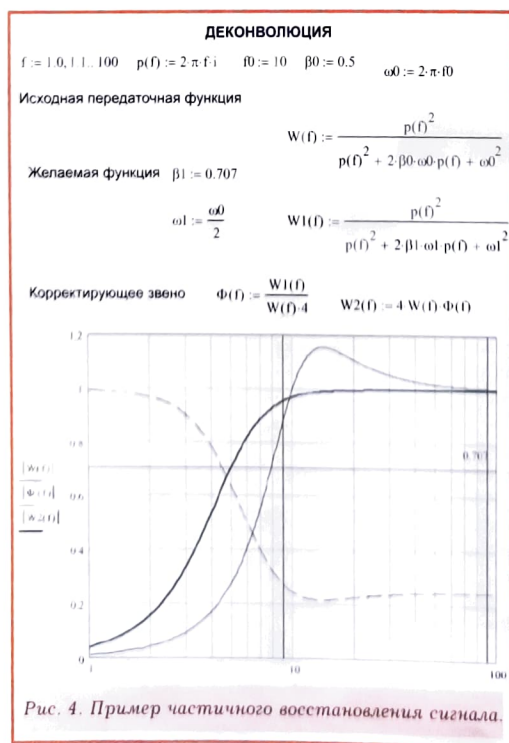


Рис. 4. Пример частичного восстановления сигнала.

рометра, т. е. выходной сигнал пропорционален ускорению.

Геофон как средство измерений нуждается в поверочной схеме. К сожалению, пока специализированная схема не разработана, хотя все научные предпосылки для её создания имеются [10]. Существуют две близкие по назначению схемы: для средств измерений сейсмоколебаний по ГОСТ 8.562 [3] и для измерений вибрации по МИ 2070 [5]. Можно рекомендовать сейсморазведчикам до создания специальной схемы, пользоваться МИ 2070. Использование ГОСТ 8.562 затруднено из-за частотного диапазона, лишь частично совпадающего с используемым в сейсморазведке, и из-за большого числа существенных ошибок в этом документе.

Итак, из всего изложенного следует ответ на вопрос в заголовке статьи:

геофон

— это аналоговый измерительный преобразователь (с точки зрения метрологии);

— это колебательное звено или апериодическое звено 2-го порядка (с точки зрения теории

автоматического регулирования);

— это фильтр верхних частот (с точки зрения теории фильтрации), и, наконец,

— это датчик сейсмических колебаний (с точки зрения геофизики).

Литература

1. ГОСТ 8.00984 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
2. ГОСТ 8.4172002 ГСИ. Единицы величин.
3. ГОСТ 8.56297 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений сейсмоперемещения, сейсмостороности и сейсмосторожения в диапазоне частот 0,0120 Гц.
4. ГОСТ 1682191 Сейсморазведка. Термины и определения.
5. ГОСТ 2434680 Вибрация. Термины и определения.
6. МИ 207090 Рекомендация ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений виброперемещения, виброскорости и виброускорения в диапазоне частот 310-1 2104 Гц.
7. А.В. Рыков. Новый электродинамический сейсмосторопитель ускорений // Приборы и системы разведочной геофизики – 2002 – № 02.
8. А.Г. Глиман. Спектральная сейсморазведка - истоки и следствия // Интернет-сайт <http://www.newgeophys.spb.ru>.
9. А.В. Стакло. Теоретические основы испытаний электродинамических сейсмосторопителей // Приборы и системы разведочной геофизики – 2006 – № 03.
10. А.В. Стакло, В.С. Симмаков. О поверочной схеме для геофонов // Законодательная и прикладная метрология – 2004 – № 4.

У НАШИХ ЗАРУБЕЖНЫХ КОЛЛЕГ

В журнале First Break (Vol.25.№2) опубликована статья «Пора пересмотреть наш подход к 3-С наземным наблюдениям». Автор статьи Bob Heath из компании Ascend Geo (США).

В статье автор анализирует сложившееся в настоящее время в наземной сейсморазведке положение с многокомпонентными наблюдениями и приходит к выводу, что 3-С наблюдения до сих пор остаются незанятой нишей на рынке геофизических услуг. Автор считает, что большие надежды, связанные с использованием MEMS датчиков при выполнении 3-С наземных наблюдений, не оправдались и, более того, по целому ряду причин препятствуют развитию данного вида наблюдений. В статье резкой критике подвергнута политика компаний-производителей MEMS геофонов, фактически стремящихся монополизировать рынок геофизического оборудования, предназначенного для выполнения многокомпонентных наблюдений. Автором выполнен подробный сравнительный анализ технических и коммерческих возможностей 3С MEMS датчиков и аналоговых 3С геофонов. Результатом анализа является вывод о том, что дальнейшее развитие 3-С наземных наблюдений должно быть связано с широким применением аналоговых 3С геофонов, возможно с Vp расстановками геофонов с короткой базой. Что касается сейсморегистрирующих систем, используемых для выполнения 3-С наблюдений, то наибольшие перспективы, по мнению автора, имеют бескабельные телеметрические сейсморегистрирующие системы.

В связи с большим объемом статьи редакция не сочла возможным поместить данную статью в этом, близком по теме, выпуске журнала. Вместе с тем, желающие могут обратиться в редакцию и получить перевод данной статьи на русском языке.



И СНОВА О СЕЙСМОПРИЕМНИКАХ...
МОН УНИВЕРСИТЕТЫ