

...Более глубокое изучение возможностей электромагнитного привода и взаимодействия сейсмоисточника с нагрузкой-грунтом может расширить технические возможности повышения качества диагностики работы сейсмоисточника, управления спектром создаваемых волн, применения наиболее эффективных режимов работы...



Ивашин Виктор Васильевич

Импульсные электромагнитные сейсмоисточники: особенности и перспективы совершенствования

Ивашин В.В., Иванников Н.А., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Под понятием "электромагнитные сейсмоисточники" подразумевается невзрывной поверхностный импульсный сейсмоисточник с силовым электромагнитным приводом, содержащим один или несколько синхронно работающих короткоходовых электромагнитов и автономную систему питания, состоящую из емкостного накопителя энергии и устройства для его заряда и разряда [1, 2, 3].

Первый экспериментальный электромагнитный сейсмоисточник на усилие 45 тонн (санного типа) был предложен и изготовлен в конце 80-х годов в Тольяттинском политехническом институте (ныне Тольяттинский государственный университет) по заказу ВО ИГ и РГИ (г. Самара). После его предварительных испытаний в ОАО "Енисейгеофизика" в начале 90-х годов была разработана серия санных (Енисей СЭМ) и колесных (Енисей КЭМ) сейсмоисточников на усилия до 100 тонн с использованием электромагнитов на усилие 25 тонн.

Особенно интенсивно модернизация сейсмоисточников и разработка их модификаций под общим названием "Енисей" начала проводиться в ОАО "Енисейгеофизика" с 2000 года [4]. В настоящее время, кроме санных (Енисей СЭМ) и колесных (Енисей КЭМ) источников, разработан и успешно прошел испытания водный (Енисей ВЭМ) электромагнитный источник для работы в транзитных зонах.

С недавних пор на рынке геофизического оборудования появились и другие невзрывные источники основанные на электромагнитном принципе - "Геотон" [5] и "Терра" [6].

Импульсные электромагнитные сейсмоисточники используются в сейсморазведке ОАО "Ханты-Мансийскгеофизика", ОАО "Тюменьнефтегеофизика", "Ямалгеофизика" и других организациях.

Указанные сейсмоисточники отличаются рядом особенностей, внесенных конструкторами с учетом опыта эксплуатации, при сохранении принципиальной конструктивной схемы, примененной в экспериментальном образце.

На рис. 1 приведена упрощенная принципиальная конструктивная схема импульсного электромагнитного сейсмоисточника, отражающая характерные связи между ее основными элементами. Жесткая плита-антенна 1 расположена на грунте и снабжена стойками 2. На плите-антенне установлена (оперта на нее) пригрузочная инертная масса 3, на которой закреплен индуктор 4 с обмоткой возбуждения 5 силового электромагнита. Якорь 6 электромагнита отделен от индуктора плоским зазором δ , (рабочий зазор) и оперт консолями 7 на стойки 2. Магнитопроводы индуктора и якоря электромагнита изготовлены из пластин электро-технической стали.

При пропускании импульса тока I по обмотке возбуждения 5 электромагнита создается магнитный поток Φ , который замыкается по магнитопроводам якоря и индуктора и проходит в основном через рабочий воздушный зазор δ . В результате между магнитопроводами якоря и индуктора возникает электромагнитная сила притяжения P , которая от якоря через его консоли 7 и стойки 2 передается на плиту-антенну 1. Под действием этой силы плита-антенна смещается вниз, грунт под ней деформируется и в результате создается сейсмическая волна.

Одновременно с перемещением якоря, стоек и плиты-антенны вниз индуктор и пригруз под действием силы P перемещаются вверх. В результате встречного движения якоря и индуктора рабочий воздушный зазор выбирается. В момент времени, когда рабочий воздушный зазор δ , равен нулю, якорь ударяется об индуктор и прекращает свое движение вниз. С этого момента времени и электромагнитная сила, действующая на плиту-антенну становится равной нулю, а якорь, притянутый силой магнитного поля к индуктору, вместе с ним и пригрузом

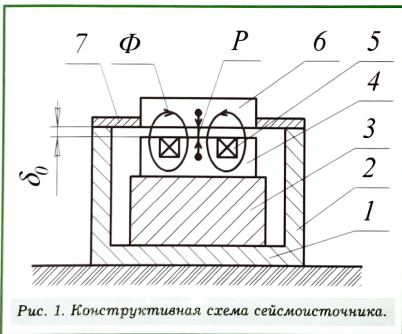


Рис. 1. Конструктивная схема сейсмоисточника.

переменяется по направлению и по величине. Затем они возвращаются вниз. Для ослабления удара якоря о ствол и пружина и катушка в момент их возврата в исходное положение между пружинами и катушкой устанавливаются демпферы (на рис. 1 не показаны).

Рассмотренная конструктивная схема является источником энергии для решения главной задачи — обеспечения необходимого импульсного механического воздействия на грунт со скоростью его деформации, обеспечивающей создание механических напряжений в грунте, при которых он проявляет в основном свои упругие свойства. Эти скорости для грунтов с различными реологическими свойствами обычно не превышают $(1-1,5)$ м/с и не должны значительно отличаться от скорости V_d частиц грунта при распространении сейсмической волны.

Примерно такие же скорости деформации грунта обеспечивают сейсмические вибраторы. Однако многие из известных импульсных сейсмостойщиков, например взрывные, типа "падающий груз", а также газодинамические и другие, воздействуют на грунт со скоростями в 10 и более раз превышающими скорость упругих деформаций. Это несоответствие скоростей приводит к низкому коэффициенту преобразования энергии воздействия на грунт в энергию его упругих деформаций и, как следствие, к усложнению сейсмостойщика, большой стоимости и потребляемой мощности.

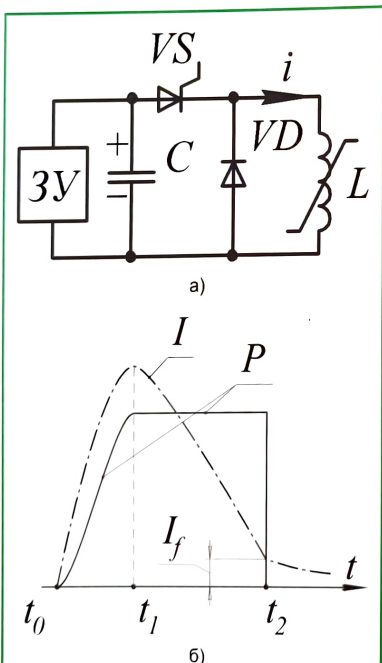


Рис. 2. Силовая часть схемы импульсного питания электромагнита:
а - принципиальная электрическая схема;
б - диаграммы силы P электромагнита и тока I в его обмотке.

Одной из важнейших частей сейсмостойщика является силовой короткоходовой электромагнит, позволяющий воздействовать на излучающую катушку импульсами силы необходимой длительности $(4-10) \cdot 10^{-3}$ с с высоким КПД преобразования потребляемой из емкостного накопителя электрической энергии в механическую. При индукции магнитного поля в рабочем воздушном зазоре δ , до $(1,8-1,9)$ Тл различаемые удельные силы на 1 см^2 площади прилегающей к рабочему воздушному зазору магнитопроводов, достигают $(14-15) \text{ кг/см}^2$, что позволяет создавать электромагниты на усилия до $(25-40)$ тонн. При изготовлении сейсмостойщиков на большие силы необходимо применять несколько спироно работающих электромагнитов.

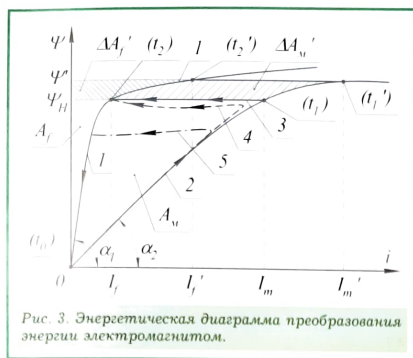
Схема импульсного питания обмотки возбуждения электромагнита позволяет обеспечить в течение времени уменьшения (выбора) рабочего зазора δ , наиболее эффективный режим энергопреобразования, характеризующийся примерным постоянством индукции магнитного поля в рабочем воздушном зазоре и создаваемой электромагнитом силы.

Емкостный накопитель энергии C заряжается от зарядного устройства $ЗУ$ до напряжения U , которое, во-первых, стабилизировано и, во-вторых, может регулироваться (рис. 2). По сигналу с сейсмостойщика в момент времени t_0 включается тиристор VS и емкость C начинает разряжаться на обмотку L электромагнита. В момент времени t_1 , ее полного разряда, когда ток I достигает максимального значения, происходит закорачивание обмотки L диодом VD и выключение тиристора VS . Преобразование магнитной энергии в механическую энергию осуществляется в основном на интервале времени $t_1 - t_2$. Величина магнитного потока Φ и, следовательно, индукции B в рабочем воздушном зазоре δ , электромагнита при этом изменяются незначительно. Уменьшение тока в обмотке возбуждения от I_m до тока намагничивания I_n на интервале времени $t_1 - t_2$ обусловлено уменьшением рабочего зазора δ при движении якоря вниз, а индуктора вверх. Энергия магнитного поля рассеяния и энергия, запасенная в стали магнитопроводов якоря и индуктора, не преобразованная на интервале времени $t_1 - t_2$ в механическую энергию, выделяется в обмотке возбуждения в виде тепла с момента времени t больше чем t_2 .

Однополярный по напряжению режим работы емкостного накопителя энергии, отдающего всю электрическую энергию на интервале времени $t_1 - t_2$ в энергию магнитного поля, определяет небольшие потери в диэлектрике конденсатора и возможность применения в накопителе C энергоемких конденсаторов, масса которых составляет небольшую часть от массы сейсмостойщика. Отключение от обмотки возбуждения емкостного накопителя энергии в момент времени t_1 выключения тиристора VS обеспечивает генерирование электромагнитом максимальной механической энергии, при которой механическое воздействие на грунт также максимально.

Наиболее полное и наглядное представление об особенностях работы сейсмостойщика, происходящих при генерировании электромагнитом механической энергии, дает его энергетическая диаграмма, характерный вид которой показан на рис. 3.

Диаграмма отражает изменение потоко-снабжения ψ обмотки возбуждения L электро-



на интервале времени $t_0 - t_1$ нарастания тока I и силы P электромагнита, индуктивность пазового рассеяния обмотки возбуждения, а также потери энергии на ее активном сопротивлении несколько изменяют теоретическую энергетическую диаграмму: она принимает вид, показанный на рис 3 пунктирной линией 4 и проходит на участке, соответствующем траектории перехода от точки t_1 до точки t_2 , несколько ниже траектории идеализированного перехода. Однако влияние отмеченных факторов на изменение потоко-сцепления в течение времени выбора рабочего зазора δ_r обычно незначительно.

При уменьшении напряжения на емкостном накопителе энергия, вводимая от него в магнитное поле электромагнита, уменьшается, и, соответственно, уменьшаются механическая энергия и развиваемая им электромагнитом сила. При этом площадь, ограниченная кривой $\Psi = i(I)$, также уменьшается (линия 5 на рис 3).

Экспериментальное определение и анализ особенностей энергетической диаграммы головного образца из серии выпускаемых сейсмоисточников позволяет определить степень соответствия его характеристик заданным проектом. При стендовых испытаниях выпускаемых сейсмоисточников ее определение необходимо для настройки режима энергопреобразования. Простота определения энергетической диаграммы дает возможность ее использования при контрольной проверке работы сейсмоисточника в полевых условиях, а также после проведения его ремонта.

Важным, но еще недостаточно изученным, является вопрос выбора рациональной длительности фронта нарастания силы (интервал времени от t_0 до t_1). Предполагалось, что длительность фронта силы должна быть возможно короче. Однако уменьшение длительности фронта силы (и тока!) ведет к возрастанию максимального тока разряда емкостного накопителя через тиристор VS и обмотку возбуждения. Это, в свою очередь, ведет к увеличению потерь в обмотке и потерь на вихревые токи в магнитопроводе электромагнита. Обмотка в этом случае должна выполняться из провода большего сечения и с меньшим числом витков, что усложняет ее изготовление.

Уменьшить максимальные токи разряда емкостного накопителя можно, если в электромагнитах, установленных на одном сейсмоисточнике, соединить обмотки возбуждения не параллельно, а последовательно. Однако такое техническое решение требует установки величины рабочих зазоров δ_r с повышенной точностью. Как показали теоретические и лабораторные исследования, при относительной не идентичности зазоров всего лишь $\pm 5\%$ различия в работе двух электромагнитов с последовательным соединением обмоток уже могут быть значительными. Особенно это заметно при работе сейсмоисточников на пониженном относительно своего номинального значения напряжении на емкостном накопителе: создаваемые электромагнитами силы к моменту выбора рабочего зазора могут отличаться в несколько раз! В связи с этим задачу уменьшения тока разряда при необходимости целесообразно решать применением в электромагнитах обмоток возбуждения с большим числом витков из провода меньшего сечения, сохраняя схему с параллельным соединением обмоток возбуждения.

В организациях, разрабатывающих и выпускающих серии электромагнитных сейсмоисточников, проведена большая работа по

магнита от тока I , проходящего по обмотке, и может быть экспериментально определена даже в полевых условиях работы сейсмоисточника. В осях Ψ и I любая площадь на диаграмме численно равна соответствующей ей магнитной или механической энергии, а зависимости $\Psi = i(I)$ отражают магнитное состояние электромагнита как преобразователя энергии. Линия 1 и $\text{tg } \alpha_1$ - характеристика намагничивания магнитопровода (при $\delta_r = 0$) и индуктивность его обмотки возбуждения; линия 2 - характеристика намагничивания (при δ_r) и соответствующая индуктивность обмотки возбуждения; площадь, ограниченная кривой $(t_1 - t_2 - t_0 - t_1)$ отражает механическую энергию A_m , а площадь, ограниченная кривой $(t_0 - t_2 - \Psi_m - t_0)$ энергию A_e , содержащуюся в стали магнитопроводов якоря и индуктора. Участок 3 между точками t_1 и t_2 является траекторией перехода и характеризует изменение потоко-сцепления и тока в процессе выбора зазора δ_r при срабатывании электромагнита. Механическая энергия A_m определяет сумму энергий, получаемых пригрузом, индуктором и якорем. С момента времени t_2 магнитная энергия A_e рассеивается в виде тепла на активном сопротивлении r обмотки возбуждения, что сопровождается уменьшением тока I_1 в обмотке с постоянной времени:

$$\tau \approx \frac{L}{R} \approx (50 \pm 100) \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

При увеличении емкости накопителя или напряжения на нем по сравнению с их номинальными значениями (форсированный режим работы сейсмоисточника) происходит увеличение потоко-сцепления с Ψ_m до Ψ' и механической энергии на $\Delta A'_m$, а также увеличивается на $\Delta A'_e$ энергия магнитного поля в стали магнитопроводов якоря и индуктора. Причем, из-за нелинейности характеристики намагничивания магнитопровода, обусловленной его существенным насыщением, всегда имеет место неравенство:

$$\frac{\Delta A'_e}{A_e} > \frac{\Delta A'_m}{A_m},$$

что приводит к снижению КПД преобразования электрической энергии, потребляемой от емкостного накопителя, в механическую энергию и сопровождается резким увеличением тока в обмотке возбуждения до I_m , а тока намагничивания до $I'_m > I_m$. В правильно спроектированном электромагните сейсмоисточника при номинальном режиме его работы величина тока I_1 должна лежать в диапазоне $(0.2 \pm 0.3) I_m$.

Незначительное уменьшение рабочего зазора δ_r

“ЕНИСЕЙ” ОТ ОАО “ЕНИСЕЙГЕОФИЗИКА” ТЕОРИЯ

совершенствованию их конструкции и технологии изготовления с учетом опыта эксплуатации. Однако еще недостаточно внимания уделяется вопросу возможности повышения сейсмической эффективности источников путем применения более согласованных с нагрузкой грунт-режимной энергоспособности, совершенствованию методов диагностики работы и передачи механической энергии в грунт.

Сила реакции грунта при сжатии плитой антенной в основном определяется его упругими свойствами. Поскольку при используемых режимах с постоянством потока энергии различаемая электромагнитом сила в течение времени выбора рабочего зазора сохраняет примерно постоянное значение, то скорость смещения плиты антенны при нагружении грунта можно считать изменяющейся по синусоидальному закону

$$V \approx \frac{P}{om} \sin \omega t, \quad (1)$$

где ω - угловая частота, определяемая суммой масс якоря m_j и плиты $m_{пл}$, а также податливостью (упругостью) грунта ξ

$$m = m_j + m_{пл}; \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{m \cdot \xi}}. \quad (2)$$

От электромагнита как источника силы P энергия передается в движение массы m и податливостью грунта ξ

$$A = \int P \cdot V \cdot dt = \frac{P^2}{\omega^2 m} (1 - \cos \omega t). \quad (3)$$

Эта энергия максимальна для частоты ω при угле $\omega t = \pi$ и накапливается в виде упругой деформации грунта x_m

$$A_{\max} = \frac{2P^2}{\omega^2 m} = \frac{\xi(2P)^2}{2} = \frac{P_\xi^2 \cdot \xi}{2}, \quad (4)$$

$$x_m = \sqrt{2P_\xi \cdot \xi},$$

то есть сила P_ξ сжатия грунта на подобие пружины теоретически достигает при принятых условиях удвоенного значения силы P электромагнита. В реальных случаях из-за потерь на неупругие деформации грунта и акустическое излучение сила P_ξ будет несколько меньше, то есть P_ξ меньше чем $2P$. Из (3) следует, что при углах $\omega t \geq \pi$ грунт разжимается и действие силы P электромагнита не приводит к увеличению передаваемой в грунт-нагрузку энергии и его деформации x_m .

При углах $\omega t \approx \pi \pm \frac{\pi}{3}$

различия в деформации грунта-нагрузки невелики, что позволяет определить режим работы сейсмостойчика на согласованную нагрузку как режим, когда длительность силы P , развиваемой электромагнитом и определяемой временем выбора рабочего зазора δ_z , примерно соответствует времени полупериода деформации грунта под плитой под действием этой силы.

Таким образом, если исходить из условия передачи от электромагнита в нагрузку-грунт возможно большей механической энергии, следует обеспечивать длительность силы P электромагнита примерно равной полупериоду колебательного процесса с частотой ω .

Поскольку сейсмостойчик практически должен работать на грунтах с различными реологическими свойствами, в том числе и с различной податливостью (лед, мерзлый и талый грунт и т.д.), то величину рабочего зазора δ_z целесообразно устанавливать, учитывая подат-

ливость наиболее "жестких" грунтов. При этом при работе на более "мягких" грунтах, податливость которых в (2 - 3) раза больше, сейсмостойчик будет работать в режиме с почти согласованной нагрузкой.

Энергия излучаемых сейсмических волн составляет сравнительно небольшую часть от энергии деформации грунта и определяется в основном скоростью деформации грунта, а не ее величиной. В связи с этим увеличение силы P является естественным средством повышения сейсмической эффективности. Но для этого требуется применение более мощного электромагнитного привода, что связано с увеличением стоимости и веса сейсмостойчика. Однако имеется и "особый" способ увеличения мощности излучения, сущность которого состоит в увеличении максимальной силы при сохранении ее среднего значения. Он достигается обеспечением упругого взаимодействия между якорем электромагнита и плитой антенны и технически может быть осуществлен помещением между якорем и плитой антенны пластин из упругого материала с определенной податливостью - например полиуретановых.

На рис. 4 приведены полученные в лабораторных условиях осциллограммы скорости перемещения плиты-антенны, отражающие скорость 1 нагружения грунта для случая режима непосредственного давления якоря на плиту-антенну, и скорость 2 при их упругом

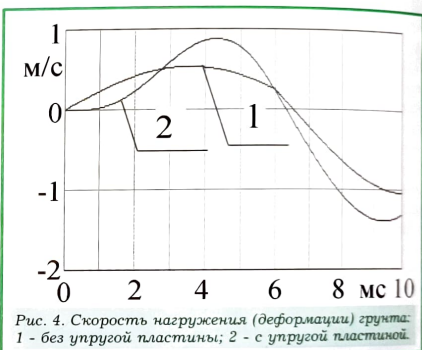


Рис. 4. Скорость нагружения (деформации) грунта: 1 - без упругой пластины; 2 - с упругой пластиной.

взаимодействию. Увеличение при упругом взаимодействии скорости нагружения грунта примерно в 1,6 раза свидетельствует о принципиальной возможности увеличения максимальной мощности сейсмостойчика примерно в 2,5 раза без изменения мощности электромагнитного привода и веса сейсмостойчика. При этом может быть расширен по частоте спектр излучаемых сейсмостойчиком волн.

В лабораторных условиях, а также при стандартных испытаниях сейсмостойчика измерение скорости движения его плиты-антенны может выполняться, например, с помощью реохордного датчика. В полевых условиях оценка работы сейсмостойчика обычно выполняется с помощью закрепленного на пригрузе акселерометра. Измерение акселерометром ускорений, получаемых пригрузом, свидетельствует лишь о величине развиваемой электромагнитом силы и о времени ее действия. Сигнал с акселерометра не учитывает характер перемещения плиты-антенны, поскольку величина развиваемой электромагнитом силы не зависит от реологических свойств грунта.

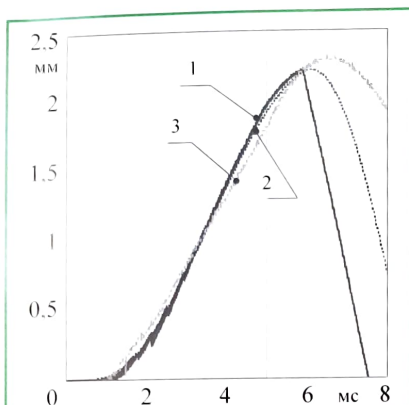


Рис. 5. Перемещение плиты-антенны (полоса) сейсмоисточника:
1 - перемещение, полученное в результате обработки осциллограмм тока в обмотке возбуждения электромагнита;
2 - перемещение, вычисленное при расчете динамики работы сейсмоисточника;
3 - перемещение, замеренное с помощью реохордного датчика.

Более удобным, надежным, информативным и пригодным для использования в полевых условиях может оказаться способ оперативной оценки работы электромагнитного сейсмоисточника с помощью измерения тока в обмотке возбуждения. Кривая изменения тока I и его величина в момент t_1 выключенного тиристора VS характеризуют уровень форсировки режима энергопреобразования электромагнита и, следовательно, развиваемую им силу. Интервал времени от t_1 до t_2 , на котором ток I в обмотке возбуждения уменьшается, а якорь и индуктор электромагнита, двигаясь навстречу друг другу, выбирают в основном рабочий зазор δ_0 , характеризует длительность приложения силы к излучающей плите-антенне. По характеру изменения тока на интервале времени от t_1 до t_2 простым методическим приемом может быть определена зависимость $x(t)$ деформации грунта в течение времени действия силы P на плиту-антенну.

На рис. 5 приведены зависимость $x(t)$ для

сейсмоисточника "Енисей СЭМ-50", полученные тремя различными способами при его испытаниях в лабораторных условиях. Сравнение между собой кривых (рис. 5) показывает, что они практически одинаковы. Это доказывает принципиальную возможность получения зависимости деформации грунта в течение времени действия силы P простым и надежным способом - посредством обработки осциллограмм тока в обмотке возбуждения электромагнита.

Электромагнитные сейсмоисточники получили сравнительно широкое применение лишь в последние 3-4 года. Их развитие должно проводиться не только в направлении улучшения конструкции, технологии изготовления, применения современной элементной базы и разработки модификаций, отличающихся развиваемой силой и весом. Более глубокое изучение возможностей электромагнитного привода и взаимодействия сейсмоисточника с нагрузкой-грунтом может расширить технические возможности повышения качества диагностики работы сейсмоисточника, управления спектром создаваемых волн, применения наиболее эффективных режимов работы и т.д.

Имеющийся опыт создания и применения электромагнитных сейсмоисточников продольных волн может быть использован при создании сейсмоисточников поперечных волн, а также создающих и продольные и поперечные волны.

Литература

1. Патент РФ №2172496. Импульсный электромагнитный привод невзрывного сейсмоисточника / Ивашин В.В., Певчев В.П. Бюл. №23, 2001.
2. Патент РФ №2171478. Импульсный невзрывной сейсмоисточник с электромагнитным приводом / Детков В.А., Ивашин В.В., Певчев В.П. Бюл. №21, 2001.
3. Патент РФ №2172497. Силовой электромагнит импульсного невзрывного сейсмоисточника / Ивашин В.В., Певчев В.П. Бюл. №23, 2001.
4. Смирнов В.П. Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда "Енисей СЭМ, КЭМ". Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики", №1, 2003, с. 21-25.
5. Анкушев В.В., Гурьев С.В., Реззов В.И. Компания "ГЕОСЕЙС" представляет новый импульсный источник возбуждения "Геотон". Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики", №1, 2003, с. 11-12.
6. Бару Ю.А., Водаков Г.С., Зайцев И.Т., Мельник А.К., Ткаченко В.П. Электромеханические источники сейсмических колебаний типа "Терра". Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики", №1, 2003, с. 18-20.

ПОДПИСИТЬСЯ

Персональная информация о подписчике/Почтовый адрес организации

ФАМИЛИЯ		ИМЯ		ОТЕЧЕСТВО	
ПОЛНОЕ НАИМЕНОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ					
ОТДЕЛ/ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ			ДОЛЖНОСТЬ		
ИНДЕКС	СТРАНА	ГОРОД		ОБЛАСТЬ/РАЙОН	
АДРЕС					
КОД ГОРОДА	ТЕЛЕФОН	ФАКС	E-MAIL		
Россия, 410019, г. Саратов, ул. Крайняя 129, СО "ЕАГО" - в редакцию "Приборы и системы разведочной геофизики"					

Стоимость годовой подписки (с почтовой пересылкой и НДС - 10%)

Наименование издания	1 комплекта	2 комплекта	3 комплекта	4 комплекта
Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики"	1600 руб.	3200 руб.	4800 руб.	6400 руб.