



В. В. Калинин
М. Л. Владов

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН МАЛЫХ ВОЛНОВЫХ РАЗМЕРОВ ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ.

Часть 1. Приближение плоских волн

АННОТАЦИЯ. В статье анализируется классический подход к созданию остронаправленных антенн. Показаны ограничения на размеры антенн при сейсмических исследованиях на поверхности и в скважинах. Предложено на основе работ С. А. Шелкунова рассмотреть вопрос о возможности построения остронаправленной антенны малых волновых размеров для широкой полосы частот. Приведены теоретические выкладки для приближения плоских волн, подтверждающие такую возможность, рассмотрены характеристики направленности для двух вариантов остронаправленных антенн и предложены комбинации из гидрофонов и геофонов для реализации теоретических расчётов, например, при сейсмических исследованиях в транзитных зонах.

Предлагаемая работа имеет целью обратить внимание сейсморазведчиков на теоретически и практически разработанные и успешно апробированные в акустике методы и технические средства для направленного приёма упругих волн.

Два объекта, представляющие научный и экономический интерес, - акватории и скважины, объединены одним уникальным свойством. Это возможность производить наблюдения во внутренних точках среды, располагая измерительные системы по вертикали. В обеих ситуациях острой остаётся проблема подавления или разделения волн, распространяющихся почти в противоположных направлениях. На акваториях во всех случаях остаётся актуальной задача подавления волн, отразившихся от границы вода-воздух, прямых волн, распространяющихся по горизонтали как для близко расположенных источника и приёмника, так и для удаленных источника и приёмника волн волноводного типа - водных и т. п. При исследованиях методом ВСП в водонаполненных скважинах помехами являются интенсивные гидроволны, слабо затухающие вдоль ствола скважины. Существует и успешно решается задача разделения волн, распространяющихся в различных направлениях при ВСП.

ABSTRACT. Classical analysis of narrow directed antenna creation is considered. Some limitations for dimension of narrow directed antenna on the surface and in the bore-holes are demonstrated. Possibility of small narrow directed antenna construction according to some works by Shelkunov are proposed. There are theoretical calculations for plane waves and some variants of hydrophone and geophones combinations are proposed.

Обычный приём для создания направленных систем состоит в суммировании сигналов, регистрируемых N отдельными одностипными, точечными приёмниками. Теория такого рода антенн, описанная в неподдающемся перечислению количестве статей и монографий, а также практика наземной сейсморазведки сформировали мнение о том, что увеличение направленности антенны всегда связано с необходимостью увеличения соотношения L/λ . Здесь L - длина антенны, а λ - длина принимаемой гармонической волны. Заметим, что для широкополосных сигналов, которые принципиально необходимы при сейсмических исследованиях, понятие диаграммы направленности вообще теряет смысл, так как она может изменяться от почти круговой (отвечающей низким частотам) до многолепестковой для высокочастотной части Фурье-спектра принимаемого сигнала. Трансформация формы характеристики направленности "длинных" антенн тем больше, чем более широкополосный сигнал пытаются создать с целью увеличения разрешающей способности.

Второе ограничение на длину антенн, работающих в вертикальном положении при исследованиях методом ВСП, состоит в том, что отдельные приёмники в антенне (группе) могут находиться в точках с существенно

разными акустическими свойствами. Как следствие, теория, описывающая характеристики направленности в однородной среде, перестает работать. На акваториях лимитирующим фактором может оказаться глубина воды.

Вопрос таким образом состоит в том - можно ли построить остронаправленную антенну малых волновых размеров (т. е. $L/\lambda \ll 1$) и к тому же широкополосную (т. е. $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} \gg 1$).

Положительный и неожиданный для многих “антенщиков” ответ дал в 1943 г. С. А. Щелкунов [6, 8]. Он предложил способ создания сверхнаправленных антенн сколь угодно малых волновых размеров.

Рассмотрим, следуя работе [8], приёмную группу с такими свойствами, ограничиваясь пока приближением плоской гармонической волны. На рис. 1 представлен способ построения сверхнаправленной антенны.

Два точечных приёмника с чувствительностью $+s$ и $-s$, расположенных на расстоянии $2d$ друг от друга, образуют диполь и принимают плоскую волну $f(t)$ со спектром $S(j\omega)$ (см. рис. 1, а). Тогда сигнал $f_2(t)$, регистрируемый суммирующим устройством от обоих приёмников, и его спектр $S_2(j\omega)$ определяются формулами

$$f_2(t) = [f(t) - f(t - \tau)]s; \tau = 2d\sin(\Theta)/c;$$

$$S_2(j\omega) = S(j\omega)(1 - e^{-j\omega\tau}) = 2je^{-j\omega\tau/2}\sin(\omega\tau/2)s.$$

Здесь c - скорость звука в среде. Суммарный сигнал $f_3(t)$ и его спектр $S_3(j\omega)$, регистрируемые антенной, изображенной на рис. 1, б определяются формулами

$$f_3(t) = sf(t) - 2sf(t - \tau) + sf(t - 2\tau);$$

$$S_3(j\omega) = S(j\omega)s[1 - 2e^{-j\omega\tau} + e^{-j\omega\tau/2}] =$$

$$= S(j\omega)s[1 - e^{-j\omega\tau}]^2 = (2j)^2e^{-j\omega\tau/2}\sin^2(\omega\tau/2).$$

Следующую группу образует система из 4 приёмников, расположенных по вертикали на расстоянии d друг от друга с чувствительностями, равными (снизу вверх) $s; -3s; 3s; -s$, по аналогии с предыдущими выкладками:

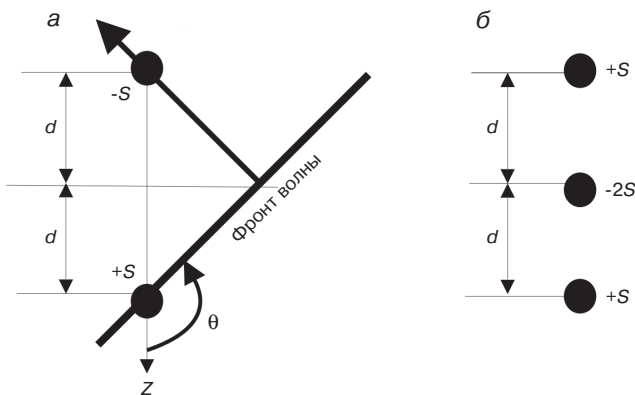


Рис. 1. Схематическое изображение двух вариантов антенн:

а - антенна из двух приёмников (диполь) с одинаковой по модулю чувствительностью; б - антенна из трёх приёмников

$$S_4(j\omega) = S(j\omega)s[1 - e^{-j\omega\tau}]^3 = (2j)^3e^{-j\omega\tau/2}\sin^3(\omega\tau/2).$$

Расширяя антенну до 5 приёмников с чувствительностями $s; -4s; 6s; -4s; -s$, получим

$$S_5(j\omega) = S(j\omega)s[1 - e^{-j\omega\tau}]^4 = (2j)^4e^{-j\omega\tau/2}\sin^4(\omega\tau/2).$$

Легко заметить, что численные значения чувствительностей приёмников в группе совпадает с коэффициентами разложения в ряд бинома Ньютона $(-a+\epsilon)^n$. Множитель $\exp(-j\omega\tau/2)$ в формулах для $S_n(j\omega)$ появляется из-за выбора начала отсчёта с момента прихода фронта волны к нижнему приёмнику. С учётом этого временного сдвига наблюдатель имеет дело с виртуальным точечным источником, расположенным в центре реальной группы, который имеет частотно-фазовую характеристику:

$$K(j\omega, \Theta) = S_n(j\omega, \Theta)/S(j\omega) =$$

$$= (2j)^n\sin^n(\omega\tau/2) = (2j)^n\sin^n((\omega d\sin\Theta)/c) =$$

$$= (2j)^n\sin^n((2\pi d\sin\Theta)/\lambda).$$
 (1)

При условии $2\pi d/\lambda \ll 1$ из (1) получим

$$K(j\omega, \Theta) = (2j)^n(2\pi d/\lambda)^n\sin^n\Theta =$$

$$= (j\omega)^n 2^n(d/c)^n\sin^n\Theta.$$
 (2)

Таким образом, при сколь угодно малом отношении d/λ в принципе можно получить сколь угодно узкую диаграмму направленности

$$\Phi(\Theta) = K(j\omega, \Theta)/K(j\omega, \Theta = \pm\pi/2) = \sin^n\Theta.$$

Во временной области, как это следует из (2), суммарный сигнал равен

$$f_n(t) = (2d/c)^n f^n(t) \sin^n\Theta.$$
 (3)

То есть сужение диаграммы направленности при таком способе её реализации ведёт к пропорциональному уменьшению чувствительности приёмной системы, изменению спектра и подчёркиванию “высоких” частот, возможно, практически неприемлемых в присутствии широкополосного шума.

Второй этап создания не только сверхнаправленной антенны, но сверхнаправленной антенны только в одном направлении состоит во введении соответствующих задержек в верхнюю или нижнюю часть приёмников.

Нам представляется, что практически приемлемой конструкцией является простейшая антенна, изображенная на рис. 1, а.

Перед суммированием сигналов с нижнего и верхнего приёмников введём в канал “-s” задержку τ_0 . Тогда:

$$f_2(t, \tau_0) = f(t) - f(t - \tau_0);$$

$$S_2(j\omega, \tau_0) = S(j\omega)s(1 - e^{-j\omega(\tau+\tau_0)}) =$$

$$= 2jS(j\omega)se^{-j\omega(\tau+\tau_0)/2}\sin(\omega(\tau + \tau_0)/2).$$
 (4)

Если выбрать $\tau_0 = d/c$, то из (4) получим

$$\begin{aligned} S_2(j\omega, \tau_0) &= S(j\omega)s(1 - e^{-j\omega(\tau+\tau_0)}) = \\ &= 2jS(j\omega)se^{-j\omega(\tau+\tau_0)/2}\sin(\omega d(1 + \sin\Theta)/2c). \end{aligned} \quad (5)$$

При условии $\omega d/c = 2\pi d/\lambda \ll 1$ получим

$$\Phi(\Theta, \tau) = (1 + \sin\Theta)/2. \quad (6)$$

Условие “ $\ll 1$ ” фактически выполняется уже при $2\pi d/\lambda \leq 0,4$, так как при $x = 0,4 \sin x = 0,3984$. При такой погрешности размер антенны $L = 2d$ ограничен значением $L \leq 0,13\lambda_{\min}$.

Формула (5) описывает кардиоиду, а приёмная антенна полностью подавляет волны, распространяющиеся под углом $\Theta = -\pi/2$, т. е. бегущие сверху вниз.

Введение задержки в канал “+s” приводит к подавлению волн, бегущих снизу вверх - под углом $\Theta = \pi/2$.

Во временной области при условии $f(t, \tau_0) = f(t) - f(t - \tau_0)$ выходной сигнал пропорционален его первой производной $f(t, \tau_0) \sim f'(t)$. При условии $S(0) = 0$ т. е. при отсутствии постоянной составляющей (что всегда имеет место с датчиками, используемыми в сейсморазведке) интегрирование суммарного сигнала приводит к конечному результату $f_2(t, \tau_0) = f(t)(1 + \sin\Theta)/2$ с учётом временного сдвига обработанного сигнала в центр установки.

Во времена аналоговой техники процедура сдвига сигнала на интервал τ_0 в сейсмическом диапазоне частот практически могла быть реализована только путём сдвига воспроизводящих головок на магнитной ленте.

При современном способе записи сигналов в цифровом виде в память ЭВМ процедура сдвига является элементарной операцией, как интегрирование сигнала, принципиально являющейся устойчивым математическим процессом.

Если технологически допустимым является использование донных установок, как это описано в работе [2], то представленная выше антенна с малыми волновыми размерами всего из двух идентичных приёмников, размещённая в водном слое, может оказаться практически приемлемой для подавления волн, отражённых от границы вода-воздух при предельно малых глубинах воды.

Дополнительные возможности по обострению диаграммы направленности связаны с использованием в качестве датчиков приёмников скорости, а не приёмников давления, обычных в практике “морской” сейсморазведки. Заметим, что скорость $V(t)$ частиц жидкости связана с давлением в плоской волне простой зависимостью, вытекающей из уравнения Эйлера

$$\rho \partial V(t, z)/\partial t + \text{grad}P(t, z) = 0, \quad (7)$$

ρ - удельная плотность жидкости. При $P(t, z) = P_0 f(t - z/c) = P_0 e^{j\omega(t - z/c)}$ в линейном приближении $V(t, z)$ обязана иметь вид

$$V(t, z) = V_0 e^{j\omega t} e^{j\varphi(\omega)}.$$

Выполняя дифференцирование по времени и координатам, получим

$$(j\omega)\rho V_0 e^{j\omega t} e^{j\varphi(\omega)} = P_0 e^{j\omega t} (j\omega/c) e^{j\omega z/c}.$$

Отсюда $V_0 e^{j\varphi(\omega)} = P_0 (1/\rho c) e^{j\omega z/c}$. И при $\varphi(\omega) = -\omega z/c$ получим

$$V(t, z) = (1/\rho c) P(t, z). \quad (8)$$

Поскольку для гармонического сигнала $V(t, z)$ и $P(t, z)$ связаны частотно-независимым коэффициентом, то для сигналов произвольного вида (в принятой модели) в жидкости форма $V(t, z)$ тождественно повторяет форму волны давления $P(t, z)$. Во-вторых, переход упругой волны из твердого тела в жидкость сопровождается генерацией волны давления, связанной со скоростью границы твердое тело(дно акватории)-жидкость частотно-независимым коэффициентом прохождения. Следствием отмеченных тривиальных фактов является то, что, измеряя давление $P(t)$ в жидкости, мы бесконтактным способом регистрируем колебательную скорость границы раздела. То есть, идеальный приёмник давления делает то же, что делает идеальный сейсмоприёмник, установленный на дне при идеальных условиях контакта приёмник-грунт. В отличие от приёмника давления, реагирующего на скалярную величину, приёмник скорости реагирует на векторную величину скорость $V(t)$.

Наиболее часто сейсмоприёмники конструктивно выполнены с подвижной системой, имеющей одну степень свободы, и, следовательно, обладают “врождённой” характеристикой направленности первого рода. Поэтому, если в качестве датчиков в дипольной антенне (см. рис. 1, а) используются приёмники скорости, то характеристика направленности $\Phi(\Theta, \tau_0)$ примет вид

$$\Phi(\Theta, \tau_0) = ((1 + \sin\Theta)/2)\sin\Theta,$$

изображенный на рис. 2.

Первые приёмники колебательной скорости были сконструированы в 30-е гг. прошлого столетия для приёма звуковых волн в воздухе. Ряд остроумных технических приёмов при их создании привёл к поныне широко используемым приборам, известным как ленточные микрофоны [4].

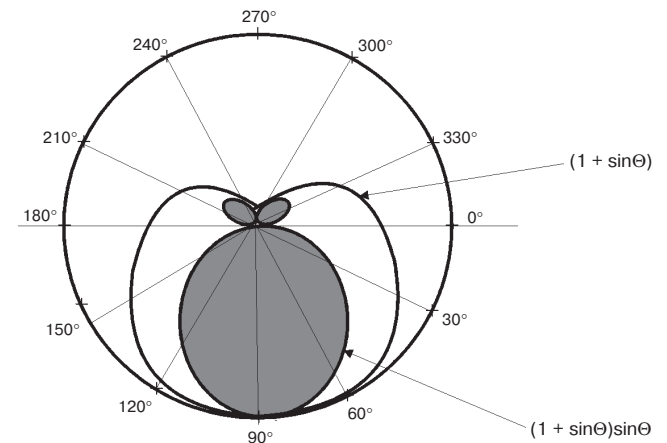


Рис. 2. Характеристики направленности для двух видов антенн

В конце 50-х гг. прошлого столетия были сконструированы гидрофоны для измерения колебательной скорости [1, 5]. Краткая теория таких приборов и строгий анализ изложены в работе [3], достаточно полная теория таких преобразователей с учётом электромеханических соотношений изложена в работе [5], а исторический обзор развития измерителей скорости уже промышленного применения изложен в работе [1]. На рис. 3 представлен внешний вид и частотные характеристики первых опытных образцов приборов этого класса [5]. (Правый из приёмников имеет диаметр 63 мм !!!)

Особенно впечатляет, что создан широкий спектр промышленно выпускаемых аппаратов с плоскими частотно-фазовыми характеристиками на диапазоны частот 70 - 8000; 10 - 500; 8 - 2000 Гц [1]. Другими словами, созданы инструменты, перекрывающие частотные диапазоны практически для всего спектра потребностей “морской” сейсмозащиты.

Альтернативный путь создания приёмных устройств с однонаправленной характеристикой лежит на поверхности - необходимо организовать сумму скалярной и векторной величины. Применительно к условиям работы на акваториях это можно осуществить следующим образом: если в каждой точке жидкого полупространства (или пространства) существует скалярная величина - давление $P(x, y, z, t)$ и векторная величина - градиент давления $\text{grad}P(x, y, z, t)$, то “существуют” и соответствующие точечные приёмник давления и приёмник градиента давления, которым с точностью до множителя ρ является акселерометр.

Для плоской гармонической волны, распространяющейся под углом Θ относительно оси z в среде с постоянной скоростью c , имеем элементарные соотношения

$$P_0(t) = P_0 \cdot e^{j\omega(t - (z/c)\cos\Theta)}$$

$$\partial P_0(t)/\partial t = (j\omega)P_0(t);$$

$$\partial P_0(t)/\partial z = -(j\omega/c)\cos(\Theta)P_0(t).$$

Тогда комбинация сигналов

$$\begin{aligned} \Phi^\pm(t) &= (1/c)\partial P_0(t)/\partial t \pm \partial P_0(t)/\partial z = \\ &= (j\omega/c)K^\pm(\Theta)P_0(t), \end{aligned}$$

где $K^\pm(\Theta) = (1 \pm \cos\Theta)$, обеспечивает кардиоидные характеристики направленности, подавляющие нисходящие волны $\Phi^-(\Theta = \pi)$ или восходящие волны $\Phi^+(\Theta = 0)$. Интегрирование функций $\Phi^\pm(t)$ по времени в пределах $-\infty - t$ приводит к частотно-независимой характеристике направленности комбинированного приёмника:

$$F^\pm(t) = \int_{-\infty}^t \Phi^\pm(t)dt = (1 \pm \cos\Theta)(1/c)P_0(t).$$

Таким образом, совмещённые точечные сенсоры обеспечивают однонаправленную угловую характеристику во всем диапазоне частот $0 \leq \omega \leq \infty$.

Эта математическая идея технически реализована в электродинамических микрофонах для приёма звуковых волн в воздухе [7] и в многочисленных конструктивных вариантах с использованием пьезоматериалов для приёма упругих волн в воде [1].

Авторами настоящей работы предложен и апробирован метод практически при исследованиях ВСП в водонаполненных скважинах, реализующий описанную идею с помощью трёх приёмников, расположенных по вертикали на расстоянии Δz друг от друга [4]. Показано, что для плоской волны $f(t)$ со спектром $S(j\omega)$, бегущей под углом Θ к оси z , комбинация сигналов на выходе такой антенны после интегрирования по t на интервале $0 - T$,

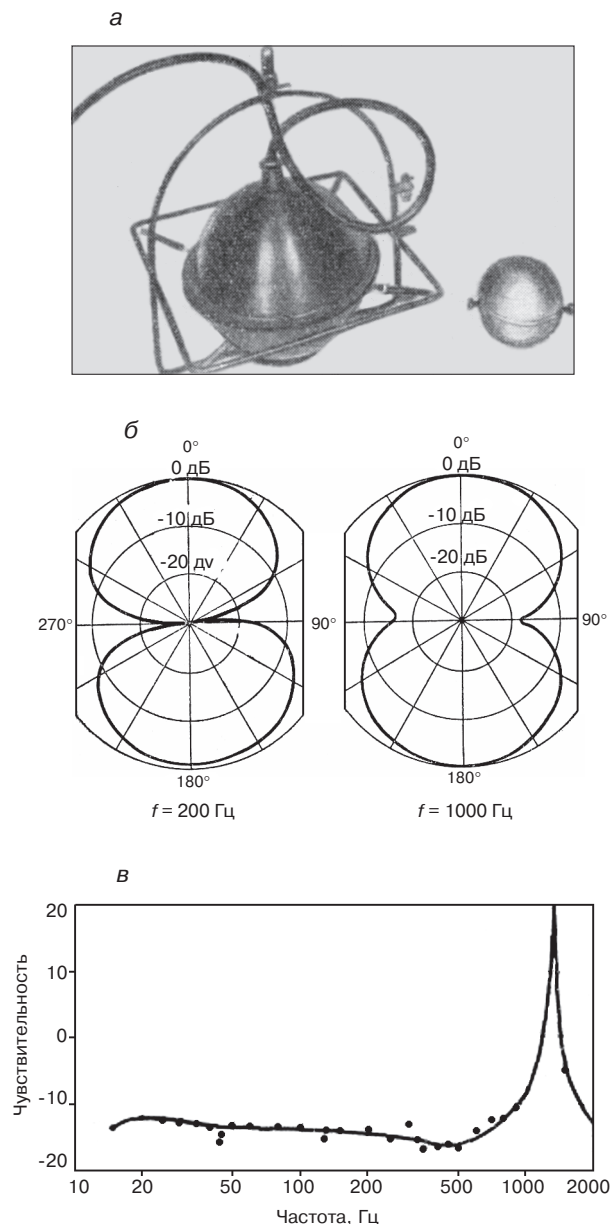


Рис. 3. Гидрофон для измерения колебательной скорости: а - внешний вид; б - характеристики направленности для двух частот; в - частотная характеристика гидрофона

где существует сигнал $f(t)$, формирует сигнал $F^\pm(t)$ со спектром

$$S^\pm(j\omega) = S(j\omega) \left[1 \pm (\cos\Theta \sin(\omega\Delta z \cos\Theta/c)) / (\omega\Delta z \cos\Theta/c) \right]. \quad (9)$$

При условии $\omega\Delta z/c = 2\pi\Delta z/\lambda \ll 1$ характеристики направленности:

$$K^\pm(\Theta) = (1 \pm \cos\Theta). \quad (10)$$

То есть имеем однонаправленный приёмник малых волновых размеров. Если считать, что $\frac{\sin X}{X} = 0,941$ при $X = 0,6$ “мало” отличается от единицы, то условие $\omega\Delta z/c = 2\pi\Delta z/\lambda \leq 0,6$ обеспечивает справедливость выражения (10) при длине антенны $L = 2\Delta z$ равной $L \leq (0,6/\pi)\lambda_{\min} \approx 0,1\lambda_{\min}$ во всем диапазоне частот $0 \leq \omega \leq \omega_{\max}$, т. е. приёмник является ещё и широкополосным.

Идея использования комбинации приёмников давления и скорости прошла в натуральных условиях в водоёмах глубиной 8 - 30 м для определения мощности поддонных отложений в диапазоне 1,5 - 9 м, плотности и скорости волн в них [1] на частотах в диапазоне 90 - 600 Гц.

Нам представляется, что использование описанных выше методов создания направленных антенн малых волновых размеров может оказаться целесообразным при исследованиях на морских акваториях при решении инженерно-геологических задач на мелководной части

шельфа, когда мощность водного слоя в несколько раз меньше необходимой глубинности исследования, а условия квазигоризонтального залегания дна и поддонных слоёв не позволяют вести селекцию волн по изменениям кривизны осей синфазности.

Объём статьи не позволяет нам дать оценку влияния сферичности фронта регистрируемых на практике волн, приводящего к неполной синфазности между давлением и колебательной скоростью, но именно малые волновые размеры приёмной группы делают более чем приемлемым приближение реальной волновой картины в терминах плоских волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко В. А., Ильичев В. И., Захаров Л. Н., 1989, Векторные фазовые методы в акустике: М., Наука.
2. Жгенти С. А., Запорожец Б. В., Лещенко Д. П., 2008, Использование синхронного РЗ-приёма колебаний при сейсморазведке в транзитных зонах для подавления интерференции волн в ближней зоне приёмника: Технологии сейсморазведки, 3, 46 - 51.
3. Исакович М. А., 1972, Общая акустика: М., Наука.
4. Калинин В. В., Калинин А. В., Владов М. Л., 1991, Метод подавления восходящих и нисходящих волн в сейсморазведке: Вестник Московского университета. Серия Геология, 6.
5. Лесли К., Кендалл Дж., Джонс Дж., 1957, Гидрофон для измерения колебательной скорости: Проблемы современной физики: Гидроакустика. Вып. 11: М., Изд-во иностр. лит.
6. Пирс Дж., 1976, Почти все о волнах: М., Мир.
7. Римский-Корсаков А. В., 1973, Электроакустика: М., Связь.
8. Schekunoff S. A., 1943, Bell System Technical Journal, 22, 80.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Виктор Васильевич КАЛИНИН - профессор кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, доктор физ.-мат. наук.

Михаил Львович ВЛАДОВ - заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, доктор физ.-мат. наук.