



## О СРАВНИТЕЛЬНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕН ПРИХОДА ВОЛН ОТ НЕВЗРЫВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

В.А. Детков<sup>1</sup>, В.Б. Кашкин<sup>2</sup>, Г.Я. Шайдуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО “Геотеххолдинг”, 660074, Красноярск, ул. Ленинградская, 66, Россия, e-mail: v-detkov@yandex.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79, Россия, e-mail: rrcvbk@rambler.ru, gshaidurov@sfu-kras.ru

Даются сравнительные статистические оценки потенциальной точности измерения времени прихода сигналов на сейсмоприемник от импульсных и вибрационных источников сейсмических волн в зависимости от отношения сигнала к шуму на выходе сейсмоприемника. Сделан вывод о равноценности этих источников по указанному параметру, внимание акцентируется на преимуществах каждого метода.

*Вибрационные источники сейсмических колебаний, импульсный источник “Енисей”, корреляционные функции, потенциальная точность измерения времени прихода волн*

### COMPARATIVE POTENTIAL MEASUREMENT ACCURACY OF WAVE ARRIVAL TIME FROM NON-EXPLOSIVE SEISMIC SOURCES

V.A. Detkov<sup>1</sup>, V.B. Kashkin<sup>2</sup>, G.Ya. Shaidurov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geotech Holding, 66, Leningradskaya str., Krasnoyarsk, 660074, Russia, e-mail: v-detkov@yandex.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University, 79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041, Russia, e-mail: rrcvbk@rambler.ru, gshaidurov@sfu-kras.ru

Comparative statistical evaluation of signal arrival time from the pulse and vibration seismic sources have been given depending on the signal to noise ratio. The authors come to the conclusion on optional equivalence of these sources and emphasize the advantages of each of the methods.

*Seismic vibrators, pulse seismic source “Enisey”, correlation functions, potential accuracy of wave arrival time*

Перед современной разведочной геофизикой стоит важная задача – повышение геологической эффективности сейсморазведочных работ. Это связано с необходимостью исследований тонкослоистых сред, которые характерны для многих районов России, в частности для Восточной Сибири.

Импульсный сигнал, излучаемый сейсмическим источником, возвращается на поверхность земли, причем происходит интерференция волн, отраженных, рассеянных и преломленных геологическими структурами. Если расстояние между двумя отражающими границами пласта достаточно велико, то интерференция от границ выражена слабо, эти отражения можно разделить, анализируя амплитуды главных максимумов наблюдаемых импульсов [Хаттон и др., 1989]. Точность определения расстояния до границ пласта при известном времени возбуждения сейсмического сигнала и известной скорости распространения сейсмических колебаний зависит от погрешности определения времени прихода сигнала на сейсмоприемник  $t_{np}$ .

Прием отраженного сигнала  $s(t)$  известной формы при неизвестном параметре  $t_{np}$  производится в присутствии аддитивной помехи  $\xi(t)$ , источниками которой являются микросейсмы и собственный шум сейсмоприемника. Предполагается, что  $\xi(t)$  – стационарный случайный процесс типа белого шума с нормальным (гауссовским) законом распределения и спектром мощности  $N_0$ . Статистическая теория оце-

нок параметров позволяет найти предельную (потенциальную) точность оценки – теоретический предел, который может быть достигнут в процессе совершенствования технологии.

При стационарном шуме и детерминированном сигнале оптимальная процедура обработки смеси сигнала с шумом основана на методе максимального правдоподобия. Если шум – гауссовский, то с точностью до аддитивной величины, не зависящей от  $t_{np}$ , логарифм функционала правдоподобия принимает вид [Волосюк, Кравченко, 2008]

$$F(t_0, t_{np}) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} s(t - t_0) s(t - t_{np}) dt + \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \xi(t - t_0) s(t - t_{np}) dt. \quad (1)$$

Здесь  $\int_0^{\infty} s(t - t_0) s(t - t_{np}) dt = K(t_0 - t_{np})$  – корреляционная функция (КФ) сигнала  $s(t)$ .

Через  $t_0$  обозначено истинное время прихода сигнала на сейсмоприемник. Второй член в выражении (1) описывает случайный процесс с нормальным законом распределения, математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией  $E/N_0$ , где  $E$  – энергия сигнала. Время прихода сигнала оценивается по положению максимума корреляционной функции. Вместо корреляционной обработки может выполняться со-

гласованная фильтрация, причем форма отклика такого фильтра с точностью до постоянного множителя совпадает с формой корреляционной функции.

Функционал  $F(t_0, t_{\text{пр}})$  имеет максимум при значении параметра  $t_{\text{пр}} = t_0$ . Оценка параметра  $t_{\text{пр}}$  по положению максимума  $F(t_0, t_{\text{пр}})$  – несмещенная и состоятельная с дисперсией  $\sigma_t^2$ . Нижний предел среднеквадратического отклонения  $t_{\text{пр}}$  от истинного значения  $t_0$  определяется неравенством Крамера–Рао [Волосюк, Кравченко, 2008]

$$\sigma_t^2 \geq - \left[ \frac{d^2 F(t_0, t_{\text{пр}})}{dt_0^2} \right]^{-1} = - \left[ \frac{d^2 K(t_0 - t_{\text{пр}})}{N_0 dt_0^2} \right]^{-1} \text{ при } t_0 = t_{\text{пр}}.$$

Для оценки  $t_{\text{пр}}$  с минимальной дисперсией  $\sigma_{t_{\text{пр}}}^2$  мин неравенство превращается в равенство, эта оценка характеризует потенциальную точность измерения времени прихода волн. Ниже найдена эта величина для двух типов невзрывных сейсмических источников, в качестве ее меры использовано стандартное отклонение  $\sigma_{t_{\text{пр}}}$  мин.

Невзрывные источники сейсмических сигналов реализуют экологически чистую технологию сейсмической разведки. По ориентировочным данным, до 40–45 % объемов сейсморазведочных работ по нефти и газу выполняется с применением вибрационных источников колебаний (ВИ) [Вибрационная сейсморазведка, 1990]. Значительное распространение получили ВИ с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), излучающие квазигармонический сигнал, частота которого, как правило, постепенно нарастает от 10 до 80–120 Гц. Для увеличения излучаемой энергии используются сигналы большой длительности, до 8–10 или даже 30 с. Перспективны источники с нелинейной частотной модуляцией, с различными видами кодовой модуляции, источники гармонических посылок [Шнеерсон, Жуков, 2007].

В импульсном невзрывном источнике “Енисей” (ИНИ) использовано оригинальное техническое решение – воздействие на грунт при движении излучающей плиты-антенны не вниз, а вверх за счет притяжения лежащего на ней груза электромагнитом [Смирнов, 2003; Патент..., 2009]. Применяемый способ создания механического напряжения позволяет

грунту наиболее полно, не разрушаясь, проявлять свои упругие свойства в линейном режиме.

Уникальной особенностью ИНИ является генерация коротких импульсов строго определенной формы длительностью порядка 6–8 мс, возможность управлять моментом излучения импульса и изменять период следования группы импульсов. Существует возможность синхронной работы группы источников, когда они включаются одновременно или последовательно, причем разброс по времени включения составляет всего несколько мкс. Это позволяет управлять частотой излучения и диаграммой направленности группы источников, создавать условия для избирательного возбуждения или подавления продольных либо поперечных волн. При меньшей затрачиваемой энергии ИНИ зачастую дает геофизические результаты, одинаковые с вибрационным источником [Детков, Шайдуров, 2009].

Рассмотрим вибрационный источник с линейной частотной модуляцией сигнала (источник ЛЧМ-сигнала) [Шнеерсон, Жуков, 2007]. ЛЧМ-сигнал длительностью  $\tau_{\text{и}}$  с амплитудой  $A_1$ , начальной частотой  $f_{\text{н}}$ , начальной фазой  $\varphi_0$  и параметром  $\mu$  (скоростью изменения частоты) записывается как

$$s_1(t) = A_1 \cos[2\pi(f_{\text{н}} + \mu t)t + \varphi_0], \quad 0 \leq t \leq \tau_{\text{и}}.$$

Корреляционная функция ЛЧМ-сигнала равна [Денисенко, 2005]

$$K(\tau) = E \frac{\sin \left[ 2\pi \Delta f \tau \left( 1 - \frac{|\tau|}{\tau_{\text{и}}} \right) \right]}{2\pi \Delta f \tau} \cos(2\pi f_0 \tau), \quad (2)$$

где  $E = \frac{A_1^2 \tau_{\text{и}}}{2}$  – энергия сигнала,  $\Delta f = \mu \tau_{\text{и}}$  – ширина спектра,  $f_0 = f_{\text{н}} + \mu \frac{\tau_{\text{и}}}{2}$  – средняя частота в спектре. На

рис. 1 показан фрагмент нормированной на энергию корреляционной функции ЛЧМ-сигнала при  $\Delta f = 70$  Гц,  $f_0 = 45$  Гц. Следует обратить внимание на наличие дополнительных выбросов (боковых лепестков) у корреляционной функции ЛЧМ-сигнала, первый из которых отмечен стрелкой. Интенсивность его по отношению к главному максимуму составляет – 6.78 дБ. Боковые лепестки КФ создают ложные максимумы, которые могут быть интерпретированы как отражения от пластов.

Разложим в (2) в окрестности главного максимума КФ тригонометрические функции в ряд при  $\tau = |t_0 - t_{\text{пр}}|$ , при этом достаточно использовать первые три члена:

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi \Delta f \tau) \cos(2\pi f_0 \tau) = \\ & = 2\pi \Delta f \tau - 2\pi \Delta f \tau \frac{(2\pi f_0 \tau)^2}{2!} - \frac{(2\pi \Delta f \tau)^3}{3!} + \dots, \\ K(\tau) & = 1 - \frac{(2\pi \tau)^2 (3f_0^2 + \Delta f^2)}{3!} + \dots, \left. \frac{d^2 K(\tau)}{N_0 d\tau^2} \right|_{t_0 = t_{\text{пр}}} = \\ & = -4\pi^2 \frac{E}{N_0} \left( f_0^2 + \frac{\Delta f^2}{3} \right). \end{aligned}$$

Таким образом, дисперсия оценки параметра  $t_{\text{пр}}$  (граница Крамера–Рао), характеризующая потенциальную точность, равна

$$\sigma_{t_{\text{пр}}}^2 \text{ мин} = \frac{N_0}{E \cdot 4\pi^2 f_0^2 \left( 1 + \frac{\Delta f^2}{3f_0^2} \right)}.$$

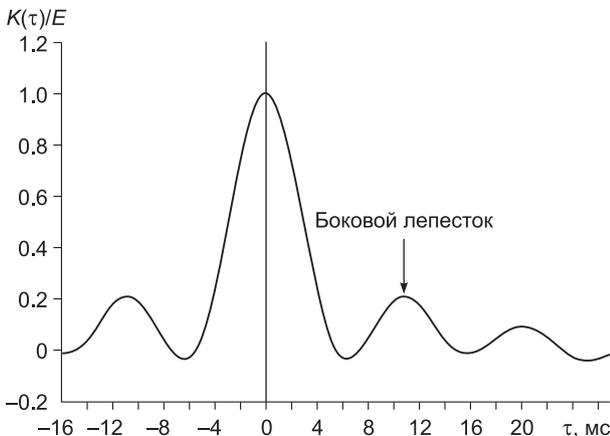


Рис. 1. Корреляционная функция ЛЧМ-сигнала.

Пусть  $f_0 = 45$  Гц,  $\Delta f = 70$  Гц. Обозначим  $q^2 = \frac{E}{N_0}$ .  
Минимальная дисперсия

$$\sigma_{t \text{ мин}}^2 = \frac{q^{-2}}{4\pi^2 3658} \quad c^2 = q^{-2} \cdot 6.924 \cdot 10^{-6} c^2,$$

потенциальная точность измерения времени прихода волн  $\sigma_{t \text{ мин}} = 2.63q^{-1}$  мс.

Сейсмический сигнал, возбуждаемый ИНИ “Енисей”, записывается в виде

$$s_2(t) = A_2 \exp(-\alpha t) \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

где  $A_2$  – амплитуда,  $\alpha$  – параметр, характеризующий затухание синусоиды  $\sin(2\pi f_0 t)$  с течением времени. Форма сигнала и параметр  $\alpha$  зависят от формы импульса, который его возбуждает, от других параметров источника и от свойств грунта. График функции  $s_2(t)$ , согласно (3), представлен на рис. 2 при  $A_2 = 1$ ,  $f_0 = 45$  Гц,  $\varphi_0 = 0$  и различных значениях отношения  $\alpha/f_0$ .

Энергия сигнала  $s_2(t)$  равна  $E = \int_0^{\infty} s_2^2(t) dt = \frac{A_2^2 \pi^2 f_0^2}{\alpha(\alpha^2 + 4\pi^2 f_0^2)}$ , КФ имеет вид:

$$K(\tau) = \int_0^{\infty} s_2(t) s_2(t + \tau) dt = \begin{cases} \frac{E \exp(-\alpha\tau)}{2\pi f_0} (2\pi f_0 \cos 2\pi f_0 \tau + \alpha \sin 2\pi f_0 \tau), & \tau \geq 0, \\ \frac{E \exp(-\alpha\tau)}{2\pi f_0} (2\pi f_0 \cos 2\pi f_0 \tau - \alpha \sin 2\pi f_0 \tau), & \tau \leq 0. \end{cases}$$

График КФ, нормированный на энергию, при  $f_0 = 45$  Гц,  $\alpha/f_0 = 3$ ,  $\alpha/f_0 = 5$ ,  $\alpha/f_0 = 9$ , показан на рис. 3. Рассмотрен случай, когда ИНИ имеет такую же среднюю частоту, что и упомянутый вибрационный источник.

КФ имеет главный лепесток на интервале около  $-8 \dots +8$  мс и боковые лепестки (побочные максимумы), например, справа первый лепесток на интервале около  $18-28$  мс. Интенсивность боковых лепестков зависит от параметра  $\alpha$ , характеризующего затухание, с ростом  $\alpha$  эта интенсивность уменьшается. Так, при  $\alpha/f_0 = 3$  интенсивность первого лепестка составляет  $-13.0$  дБ по отношению к главному лепестку, при  $\alpha/f_0 = 5$  она равна  $-21.7$  дБ, при  $\alpha/f_0 = 9$  она соответствует  $-30.4$  дБ. Интенсивность второго и последующих лепестков еще меньше и может не учитываться. При использовании ИНИ можно регулировать параметр затухания  $\alpha$  аппаратными средствами с уче-

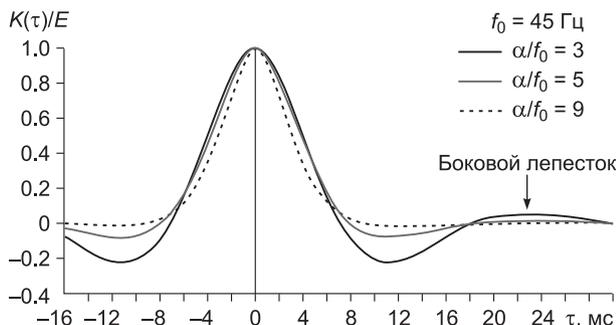


Рис. 3. Нормированная корреляционная функция сигнала, возбуждаемого ИНИ “Енисей”.

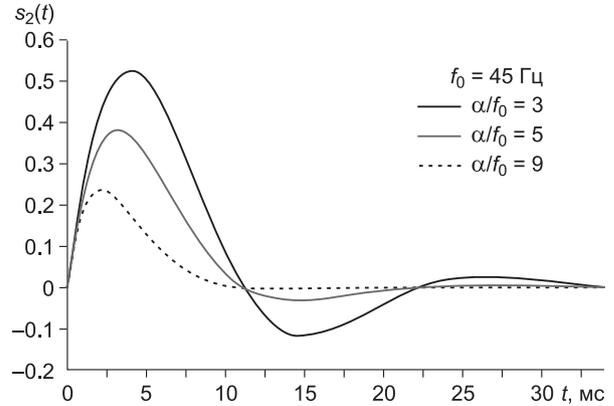


Рис. 2. Форма сигнала, возбуждаемого ИНИ “Енисей”.

том свойств грунта и устанавливать необходимый уровень боковых лепестков.

Однако, как это видно из рис. 2, с ростом  $\alpha$  уменьшается интенсивность сигнала  $s_2(t)$ . При  $\alpha/f_0 = 5$  максимальная амплитуда сигнала изменилась на  $2.78$  дБ по отношению к такой же амплитуде при  $\alpha/f_0 = 3$ , а при  $\alpha/f_0 = 9$  на  $5.02$  дБ. Тем не менее существенный выигрыш в подавлении боковых лепестков остается.

Энергетический спектр  $G(f)$  несет важную информацию о свойствах сигнала, его можно найти через преобразование Фурье от КФ. Энергетический спектр сигнала  $s_2(t)$  имеет вид

$$G(f) = E \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau = 2E\alpha \left\{ \frac{1}{\alpha^2 + 4\pi^2 (f + f_0)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + 4\pi^2 (f - f_0)^2} \right\}.$$

График энергетического спектра, нормированный на энергию  $E$ , при  $f_0 = 45$  Гц,  $\alpha/f_0 = 3$ ,  $\alpha/f_0 = 5$ ,  $\alpha/f_0 = 7$ ,  $\alpha/f_0 = 9$ , показан на рис. 4.

Следует обратить внимание на зависимость формы энергетического спектра от параметра затухания  $\alpha$ . В данном случае  $\alpha/f_0 = 5$  и  $9$ . В целом ширина спектра сигнала ИНИ сопоставима с шириной спектра ВИ со средней частотой  $f_0 = 45$  Гц и полосой  $70$  Гц, но спектр имеет продолжение в сторону более высоких частот, что полезно с учетом необходимости компенсации роста коэффициента поглощения в среде с увеличением частоты.

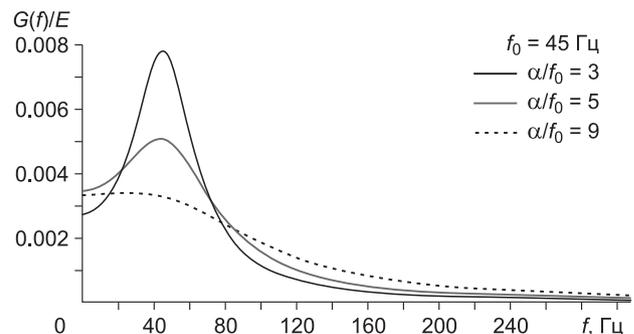


Рис. 4. Нормированный график энергетического спектра сигнала, возбуждаемого ИНИ “Енисей”.

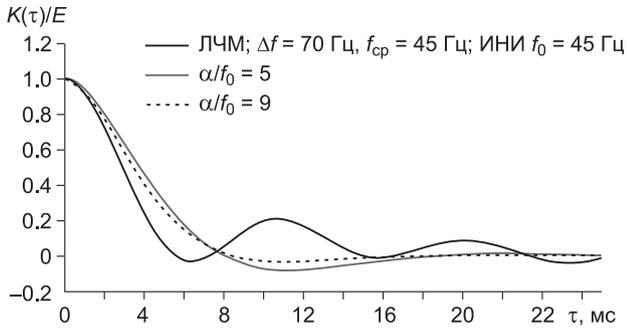


Рис. 5. Нормированная корреляционная функция сигналов, возбуждаемых вибрационным источником и ИНИ.

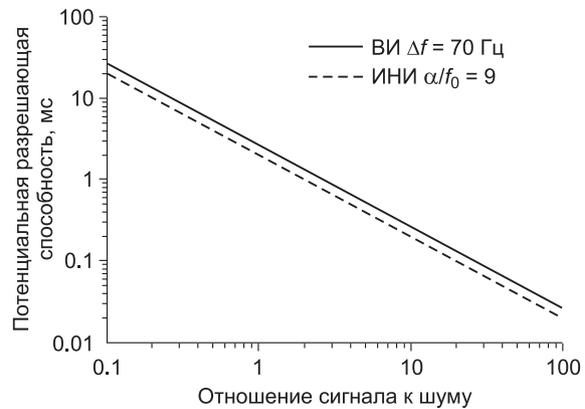


Рис. 6. Потенциальная точность измерения времени прихода волн для двух типов источников.

Таким образом, при работе с ИНИ возможна регулировка формы энергетического спектра путем подстройки параметра затухания  $\alpha$  аппаратными средствами с учетом свойств грунта. На рис. 5 при  $\tau \geq 0$  показана нормированная КФ ЛЧМ-сигнала с  $\Delta f = 70$  Гц, для сравнения приведены графики КФ сигнала ИНИ с такой же средней частотой и сопоставимой шириной спектра. Следует отметить, что наличие боковых лепестков у КФ ЛЧМ-сигнала и практическое отсутствие их у КФ сигнала ИНИ.

Вычислим потенциальную точность измерения времени прихода волн для ИНИ:

$$\left. \frac{d^2 K(\tau)}{N_0 d\tau^2} \right|_{t_0=t_{\text{пр}}} = -\frac{A_0^2}{N_0} \frac{2\pi f_0}{4\alpha} = -\frac{E}{N_0} (\alpha^2 + 4\pi^2 f_0^2);$$

$$\sigma_{t_{\text{мин}}}^2 = \frac{N_0}{E} \frac{1}{(4\pi^2 f_0^2 + \alpha^2)}.$$

Величина  $\sigma_{t_{\text{мин}}}^2$  зависит от параметра затухания  $\alpha$  и частоты колебаний  $f_0$ , уменьшается с ростом  $\alpha$ ,  $f_0$  и  $q^2$ . Для ИНИ при  $f_0 = 45$  Гц,  $\alpha/f_0 = 3$ ,  $\sigma_{t_{\text{мин}}}^2 = q^{-2} \cdot 1.018 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2$ , потенциальная точность измерения времени прихода волн  $\sigma_{t_{\text{мин}}} = 3.19 q^{-1} \text{ мс}$ , при  $\alpha/f_0 = 5$ ,  $f_0 = 45$  Гц  $\sigma_{t_{\text{мин}}} = 2.77 q^{-1} \text{ мс}$ , а при  $\alpha/f_0 = 9$ ,  $f_0 = 45$  Гц  $\sigma_{t_{\text{мин}}} = 2.02 q^{-1} \text{ мс}$ .

Зависимость потенциальной точности измерения времени прихода волн  $\sigma_{t_{\text{мин}}}$  от отношения сигнала к шуму  $q = \sqrt{\frac{E}{N_0}}$  для двух типов сейсмических источников

показана на рис. 6. На нем видно, что вибрационный источник с ЛЧМ при средней частоте 45 Гц в полосе частот 70 Гц при отношении сигнала к шуму  $q = 3$  обеспечивает  $\sigma_{t_{\text{мин}}} \sim 0.9 \text{ мс}$ , а ИНИ “Енисей” с такой же средней частотой и сопоставимой шириной спектра –  $\sigma_{t_{\text{мин}}} \sim 0.7 \text{ мс}$ .

Таким образом, при одинаковой средней частоте, сопоставимой ширине спектра и одинаковом отношении сигнала к шуму потенциальные точности оценки времени прихода импульса  $t_{\text{пр}}$  у ИНИ “Енисей” и вибрационного источника с ЛЧМ-сигналом различаются незначительно. В этом нет ничего удивительного – параметры этих источников  $f_0$  и  $\Delta f$  в той или иной мере согласованы с параметрами геологической среды.

ИНИ “Енисей” обеспечивает потенциальную точность измерения времени прихода волн, практи-

чески такую же, как и ВИ с ЛЧМ-сигналами при меньшей энергии источника. При использовании ВИ с ЛЧМ возможны ошибки в интерпретации результатов из-за наличия боковых лепестков у корреляционной функции ЛЧМ-сигнала.

Преимуществами ИНИ по сравнению с ВИ являются меньшие энергетические затраты, меньшая масса и стоимость, возможность работы при выключенном приводном двигателе внутреннего сгорания, который создает вибрационные помехи для сейсмодатчиков. С другой стороны ВИ обладают высоким энергетическим потенциалом, их целесообразнее применять в районах с большим уровнем промышленных помех.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в соответствии с Постановлением Правительства РФ П218 от 09.04.2010.*

## Литература

- Вибрационная сейсморазведка** / М.Б. Шнеерсон, О.А. Потапов, В.А. Гродзенский и др.; под ред. М.Б. Шнеерсона. М.: Недра, 1990. 240 с.
- Волосюк В.К., Кравченко В.Ф.** Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. М.: Физматлит, 2008. 704 с.
- Денисенко А.Н.** Сигналы. Теоретическая радиотехника: Справ. пособие. М., 2005. 704 с.
- Детков В.А., Шайдулов Г.Я.** Некоторые результаты экспериментальных работ по управлению параметрами излучения импульсных невзрывных источников типа “Енисей” // Приборы и системы разведочной геофизики. 2009. № 3. С. 27–30.
- Пат. № 2372629 (RU).** Способ невзрывного воздействия на грунт при сейсмической разведке / Детков В.А., Ивашин В.В., Федотов И.Г., Шайдулов Г.Я. Опубл. 10.11.2009. Бюл. № 31.
- Смирнов В.П.** Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда “Енисей СЭМ, КЭМ” // Приборы и системы разведочной геофизики. 2003. № 1. С. 21–25.
- Хаттон Л., Уэрлингтон М., Мейкин Дж.** Обработка сейсмических данных. Теория и практика. М.: Мир, 1989. 216 с.
- Шнеерсон М.Б., Жуков А.П.** Настоящее и будущее вибрационной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2007. № 2. С. 10–13.

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*ДЕТКОВ Владимир Алексеевич* – управляющий директор ЗАО “Геотеххолдинг”, кандидат технических наук.  
E-mail: v-detkov@yandex.ru

*КАШКИН Валентин Борисович* – профессор кафедры радиотехники СФУ, доктор технических наук.  
E-mail: rtcvbk@rambler.ru

*ШАЙДУРОВ Георгий Яковлевич* – профессор кафедры радиоэлектронных систем СФУ, доктор технических наук.  
E-mail: gshaidurov@sfu-kras.ru