



## О РЕАЛЬНЫХ И МНИМЫХ ПРЕИМУЩЕСТВАХ ЦИФРОВЫХ ЗОНДОВ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

**В.А. Багмут<sup>1</sup>, В.А. Рюмин<sup>2</sup>, А.В. Багмут<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ЧП “Геофизприбор”, 97570, Симферополь, с. Чистенькое, ул. Советская, 110/12, Крым, Украина,  
e-mail: bagmut@bk.ru

<sup>2</sup>ЧАО “Геофизическая компания “НАДРА”, 04114, Киев, ул. Дубовицкая, 28, Украина

<sup>3</sup>Крымская геофизическая экспедиция “Крымгеофизика”, 95007, Симферополь, ул. Беспалова, 47, Крым, Украина,  
e-mail: geophys@sf.ukrtel.net

Статья посвящена сравнительному анализу возможностей аппаратуры ВСП, оснащенной различными вариантами цифровых систем передачи и ВИМ, в зависимости от температуры в зоне исследований и длины примененного геофизического кабеля. Выполнен анализ и сделаны выводы относительно зависимости основных характеристик цифровых скважинных зондов от соотношения длины кабеля и скорости передающего устройства.

*Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), времяимпульсная модуляция (ВИМ), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), цифровой зонд, динамический диапазон (ДД), частотный диапазон, пропускная способность кабеля геофизического*

### REAL AND IMAGINARY ADVANTAGES OF DIGITAL PROBES FOR VERTICAL SEISMIC PROFILING

**V.A. Bagmut<sup>1</sup>, V.A. Ryumin<sup>2</sup>, A.V. Bagmut<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Private enterprise “Geofizpribor”, Sovetskaya str., 110/12, Village Chisten'koe, Simferopol, 97570, Crimea, Ukraine,  
e-mail: bagmut@bk.ru

<sup>2</sup>Private joint-stock company “Geophysical company NADRA”, Dubovitskaya str., 28, Kiev, 04114, Ukraine

<sup>3</sup>The Crimean geophysical expedition “Krymgeofizika”, Bespalova str., 47, Simferopol, 95007, Crimea, Ukraine,  
e-mail: geophys@sf.ukrtel.net

The article is devoted to the comparative analysis of possibilities of VSP equipment, equipped with various variants of digital transmission systems and time modulation system, depending on temperature and a lengths of geophysical cable. We make conclusions concerning dependence of the basic characteristics of digital borehole probes on a ration of the cable length and a speed of the sending device.

*Vertical seismic profiling (VSP), pulse-time modulation, the analog-digital converter (ADC), digital probe, dynamic range (DR), frequency range, throughput of a geophysical cable*

Преимущества цифровых систем обработки, хранения и передачи информации общеизвестны и неоспоримы. Благодаря им цифровые сейсморазведочные станции в свое время заменили аналоговые.

В статье [1] при анализе возможностей цифровых зондов Российской Федерации в качестве эталона для их оценки были выбраны зонды с ВИМ АПМ4-3М, разработанные ЧП “Геофизприбор” (г. Симферополь). При этом (поскольку сравнение, как правило, было не в пользу цифровых зондов) некоторые разработчики считают наши выводы необъективными и оспаривают их. В частности, А.Д. Чигрин [2] в ответ на публикацию [1] утверждает: 1) что цифровые зонды уступают зондам с ВИМ только по максимальной температуре применения; 2) что цифровой сигнал абсолютно не подвержен искажениям в кабеле; 3) что применение цифровых зондов “радикально, на несколько порядков, повысило качество (точность, динамический диапазон) регистрируемого материала... оцифровка сигнала в скважине позволила радикально повысить канальность (число каналов) и частоту дискретизации” (с. 91); 4) “Когда цифровые техноло-

гии были недостаточно развиты, ВИМ рассматривалась в ВСП как альтернатива и непосредственной передаче по кабелю и оцифровке сигнала в скважине” (с. 92).

Рассмотрим дополнительно к зондам РФ некоторые характеристики цифровых зондов, разработанных в Украине.

1. Трехточечный, двенадцатиканальный зонд ЦПМ3-1 (ЧП “Геофизприбор”) уступает зонду АПМ4-3М, по крайней мере, по трем параметрам – максимальной рабочей температуре, числу каналов и длине используемого кабеля.

2. ЦРА-ВСП-3Б-1Р (далее – ЦРА) [3]. Разработан УкрГГРИ, г. Киев. Способ уплотнения: “цифровое кодирование”. Разрядность АЦП – 16. Динамический диапазон этого зонда в рекламе указан равным 72 дБ. Особенности применения: при работе одноприборным зондом (4 канала) период дискретизации сигнала равен 1 мс, двухприборным – 2 мс и трехприборным – 4 мс.

3. “Цифровой зонд с 21-разрядным АЦП”. Разработчик – фирма “Муссон-Ласпи”, г. Севастополь.

На рис. 1 приведена запись, полученная при обработке одного и того же интервала в скважине этим зондом и АПМ4-3.

Этот зонд был выпущен в единственном экземпляре и практического применения не нашел.

Для того чтобы сравнить возможности различных типов зондов, рассмотрим особенности способов передачи цифровых и ВИМ сигналов.

Динамический диапазон сейсмического сигнала как в наземной, так и в скважинной сейсморазведке составляет около 80 дБ [4]. Для преобразования сигнала с таким диапазоном в цифровой код необходимо 15 разрядов АЦП (80 дБ/6, дБ  $\approx$  14 разрядов плюс знаковый разряд). Но по данным некоторых источников [5, 6], а также исходя из нашего опыта, кроме 15 разрядов, представляющих код сигнала, АЦП должен иметь еще не менее 7 разрядов для представления сигнала, амплитуда которого равна или близка к напряжению собственного шума.

В аппаратуре с ВИМ, динамический диапазон которой составляет 80–90 дБ, в цифровой код сигнал преобразуется в наземном регистраторе. Количество разрядов АЦП, которое может быть задействовано на преобразование шума, зависит только от его характеристик.

Если в цифровых зондах к 15 разрядам АЦП, которые занимает сигнал (84 дБ), добавить 7 разрядов на преобразование шума, то число разрядов информации, которое необходимо передавать по кабелю, составит  $15 + 7 = 22$  разряда и, тем самым, приблизится к числу разрядов современной наземной сейсмостанции (24 разряда). Тогда почему бы не устанавливать 24-разрядные АЦП и в цифровых зондах? Тем более что телеметрические сейсморегистрирующие системы “Прогресс-Т155, Т3, Т2”, у которых соответственно 1-, 3- и 6-канальные блоки сбора данных (БСД) – АЦП с “обвязкой” расставляются по профилю и выполняют те же функции, что и АЦП скважинных приборов, представляют собой практически готовые цифровые зонды. Разница заключается в нескольких моментах:

1) расстояние от сейсмостанции до первого БСД составляет 50–300 м, а до скважинных приборов цифрового зонда оно может быть несколько (до 7) километров;

2) каждый БСД – это еще и промежуточный усилитель цифрового кода, поступающего по кабелю от последующего (точнее – всех последующих) БСД;

3) в сейсмических косах в качестве линии связи используется набор витых пар, в цифровых зондах – кабель геофизический грузонесущий (далее – кабель).

Очевидно, что для ответа на поставленный выше вопрос необходим анализ пропускной способности кабеля.

Емкость наиболее распространенного кабеля КГЗ-67-180 составляет 0,09–0,13 мкФ/км [7], полоса пропускания 10–100 кГц [8].

В реальной кабеле, при наличии на входе приемника шума, расчет скорости передачи выполняется по теореме Найквиста–Шеннона [9]:

$$C_{\text{н}} = \Delta f \cdot \log_2 (1 + S/N) \text{ кбит/с,}$$

где  $S/N$  – отношение полной мощности сигнала к полной мощности шума на входе приемника, при этом напряжения относятся как квадраты их значений  $U^2/U_{\text{ш}}^2$ .

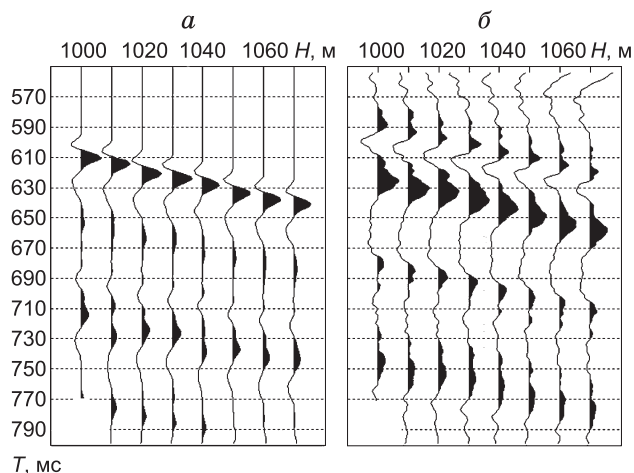


Рис. 1. Фрагменты полевых записей, выполненных АПМ4-3 (а) и цифровым зондом (б).

Если предположить, что при приеме цифрового кода минимальный сигнал, который можно отделить от помехи, – это сигнал, равный шуму по мощности ( $S/N = 1$ ), то получим, что пропускная способность равна полосе пропускания:

$$C_{\text{н}} = \Delta f \cdot \log_2 (1 + S/N) = \Delta f \log_2 = \Delta f \text{ кбит/с.}$$

Иными словами, максимальная скорость передачи сигнала по такой линии связи не может превышать верхней границы ее полосы пропускания.

Из теоремы Котельникова следует, что для восстановления сигнала с приемлемой точностью частота дискретизации должна превышать граничную частоту сигнала  $f_{\text{гр}}$  в 4,14 раза [6]. Заметим, независимо от способа (ВИМ или цифровой) на практике граничная частота сейсмического сигнала принята равной 250 Гц и, соответственно, период дискретизации – 1 мс.

Если принять число бит старт-стоп, необходимых для синхронизации передачи по кабелю последовательного кода, равным 4, то получим, что техническая скорость передачи информации  $C_{\text{т}}$  (т. е. скорость передающего устройства) составит:

для 12-канального зонда и 24-разрядного АЦП:

$$C_{\text{т}} = 12 \cdot (24p + 4p) \cdot 1000 \text{ мс} = 336 \text{ кбит/с,}$$

т. е. скорость передачи более чем в 3 раза превышает полосу пропускания кабеля;

для 9-канального зонда и 12-разрядного АЦП:

$$C_{\text{т}} = 9 \cdot (12p + 4p) \cdot 1000 \text{ мс} = 144 \text{ кбит/с.}$$

Как видим, скорость передачи в обоих вариантах превышает 100 кбит/с, а значит, и верхнюю границу полосы пропускания кабеля, равную 100 кГц. Очевидно, что применение 24-разрядных АЦП при заданном числе каналов и периоде дискретизации ограничивается пропускной способностью кабеля.

Для сравнения – длительность импульсов, передаваемых по кабелю, одинакова в образцах с ВИМ как в АПМ3-3М (12 каналов 1 мс), так и АПМ4-3М (16 каналов, 1 мс) и равна 15 мкс.

Информационная скорость передачи по теореме Хартли:

$$C_{\text{и}} = 1/\Delta T = 1/(15 \cdot 10^{-6}) = 66,67 \text{ кбит/с [9].}$$

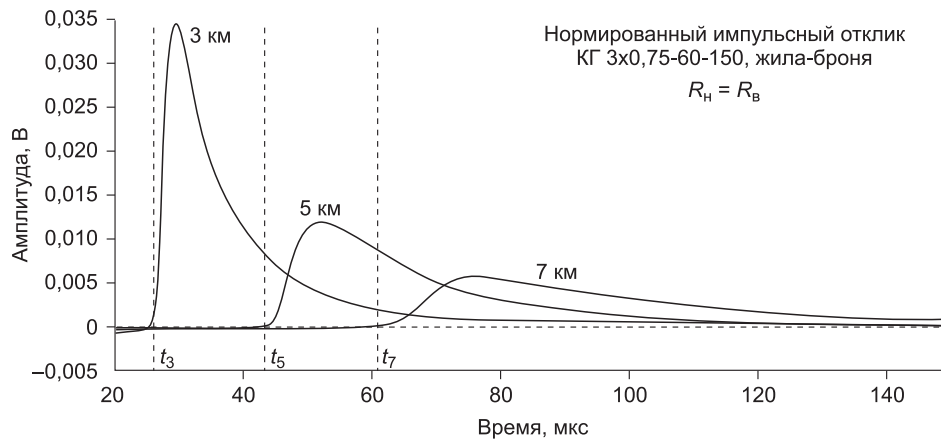


Рис. 2. Нормированный импульс отклика на воздействие единичным импульсом.

Таким образом, максимальная скорость передачи не превышает полосу пропускания кабеля и, как результат, – обеспечивается передача информации этих зондов по кабелю любой (7 км и более) длины.

Для того чтобы определить, как и насколько можно увеличить информационную скорость системы обратимся к работе А.В. Давыдова [8]. На рис. 2 представлены некоторые частотные свойства КГ 3, приведенные в [8].

В таблице представлены результаты изучения свойств кабеля, его пропускной способности по длительности отклика на воздействие единичным импульсом (строки 1, 2, 3) и возможные способы ее повышения (4, 5). При передаче сигналов однополярными импульсами предельная скорость передачи  $C_{и}$  может быть определена как  $C_{и} = 1/2\Delta T_{к}$  кбит/с, где  $\Delta T_{к}$  – эффективная длительность импульса отклика. Для бинарных симметричных линий связи, поскольку длительность посылок и пауз совпадает, скорость передачи  $C_{т}$  выражается в бит/с [9].

Из анализа данных (см. таблицу) следует, что только при длине кабеля 1 км (пропускная способность  $C_{и} = 151,5$  кбит/с  $>$   $C_{т} = 144$  кбит/с) можно передать сигнал от 9 каналов 12-разрядным кодом с периодом дискретизации 1 мс.

При передаче информации двуполярным кодом Манчестер II скорость передачи может быть увеличена вдвое по сравнению с предельной ( $C_{и} = 1/2\Delta T_{к}$  кбит/с), а за счет применения корректора – в четыре раза ( $C_{и} = 1/0,5\Delta T_{к}$  кбит/с).

Корректор (формы, а не кода) может представлять собой фильтр нижних частот, полосовой фильтр, схему частичной деконволюции сигнала (линию задержки импульса и схему сложения его в определенном соотношении с откликом), АЦП, сдвиговый регистр, микропроцессор и т. д.

С точки зрения теории передачи сигналов, повышение их частоты и усложнение схем приема приводит к тому, что на точность передачи начинают оказывать влияние межсимвольные искажения и неидеальность синхронизации

$$C_p/C_T = \gamma_{мс} \cdot \gamma_{сх} [10],$$

где  $C_p$  – реальная скорость передачи;  $C_T$  – расчетная скорость передачи;  $\gamma_{мс}$  – коэффициент, учитывающий влияние межсимвольных помех, его значение принимается в пределах 0,7–0,9;  $\gamma_{сх}$  – коэффициент, учитывающий неидеальность синхронизации, его значение принимается в пределах 0,6–0,8.

Незначительно скорость передачи информации можно увеличить, передавая ее по линии жила-жила, имеющей меньшую емкость, использовать три пары жил семижильного кабеля для параллельной передачи трех потоков информации или, применив еще другие меры, зависящие от опыта и возможностей разработчика и пользователя.

Разработчики ЦРА, например, преодолевают ограничение пропускной способности кабеля длиной до 6 км, изменяя период дискретизации в зависимости от числа каналов. Это приводит к тому, что спектр

Длительность импульсного отклика ( $\Delta T_{к}$ ) для различной длины кабеля КГ 3x0,75-60-150, жила-броня и расчетная скорость передачи данных

Параметр	Длина кабеля, км						
	1	2	3	4	5	6	7
Эффективная ширина импульсного отклика $\Delta T_{к}$ , мкс	3,3	8,6	14,1	19,9	21,1	33,1	40,9
Предельная скорость передачи данных $C_{и} = 1/2\Delta T_{к}$ , кбит/с	151,5	58,1	35,5	25,1	19,2	25,1	12,2
Тактовая частота передачи данных $C_{и} = 1/\Delta T_{к}$ , код Манчестер II, кбит/с	306	117	71	50,3	38,3	30,3	24,4
Скорость передачи при частичной деконволюции. Код Манчестер-II – импульс двуполярный $C_{и} = 1/(0,5\Delta T_{к})$ , кбит/с	606	232,4	142	100,6	76,8	60,4	48,8

передаваемого сигнала всегда остается в полосе пропускания кабеля. Отсюда следует, что в цифровом зонде необходимо предусматривать возможность состыковки входа приемника с каждым кабелем, возможность и способ сокращения объема информации при увеличении его длины. Кроме того, параметры кабеля могут быть разными при изменении глубины погружения, температуры и т. д., следовательно, в процессе работы они должны периодически контролироваться.

Для того чтобы оценить, какую роль сыграла аппаратура с ВИМ в становлении метода и был ли период ее применения проходным этапом, сделаем небольшой экскурс в историю развития вопроса.

Разработка аппаратуры для многокомпонентной ВСП с системой электронного уплотнения ВИМ была начата в Крымской геофизической экспедиции во второй половине 70-х годов прошлого века, на базе нескольких вариантов одноприборных зондов с прямой передачей информации.

В основу опытного образца были положены конструкция скважинного прибора СППУ-2 (ВНИИГИС, г. Октябрьский), система контроля сейсмоприемников СКТБ СЭТ (г. Краснодар) и система передачи с ВИМ, разработанная в ИФЗ АН СССР (г. Алмата).

Переход от скалярной регистрации при ВСП к векторной многокомпонентной потребовал:

- 1) ужесточения требований к идентичности диаграмм направленности сейсмоприемников, включая и разброс амплитудных характеристик каналов, т. е. сквозных трактов, с 25 до 5 % [11] и примерно в такой же пропорции к частотной характеристике. Для обеспечения этих требований была применена не ортогональная (декартова) система расстановки сейсмоприемников  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , а симметричная 1, 2, 3,  $Z$ . Такая расстановка позволила обеспечить одинаковые условия применения для сейсмоприемников 1, 2, 3. Кроме того, была обеспечена возможность контроля идентичности их характеристик сравнением суммы сигналов наклонных и вертикального сейсмоприемников непрерывно, по рабочему сигналу;

- 2) снижения до пренебрежимо низкого уровня паразитных колебаний за счет усовершенствования конструкции скважинных приборов.

Применение зондов с электронным уплотнением позволило:

- 1) сохранить принятую ранее производительность: число скважинных приборов до 3 (и, соответственно, каналов до 9–12);

- 2) обеспечить аппаратурный контроль идентичности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сквозных трактов, оснащенных установками сейсмоприемников, как  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , так и 1, 2, 3,  $Z$ ;

- 3) исключить влияние на передаваемый сигнал помех от питающей сети и блуждающих токов и тем самым расширить динамический диапазон записей.

Во второй половине 1980-х годов аппаратура с ВИМ разрабатывалась многими разработчиками: ВНИИГИС (АСПУ-ТЗ-48), в кооперации со специалистами Новосибирска, СКТБ СЭТ (ССК-3), ПО “Татнефтегеофизика”, г. Бугульма (ПМЗ-823, ПМ4-823). Правда, до рабочего состояния были доведены приборы только “Татнефтегеофизики”. В то же время к концу 1980-х годов аппаратурный ряд АПМ

нашел достаточно широкое (сотни скважин) применение в Украине, РФ, Туркменистане. В 1996 г. он внесен в “Инструкцию по сейсморазведке” Российской Федерации [12].

Применение ВИМ в аппаратуре для скважинной сейсморазведки не может считаться промежуточным этапом. Во-первых, по условиям применения зонды с ВИМ, безусловно, превосходят цифровые. Во-вторых, опыт обработки данных ВСП, полученных цифровыми зондами разных производителей, в том числе и дальнего зарубежья, показывает, что они, по меньшей мере, не превосходят данные, полученные аппаратурой с ВИМ. И причина этого не только в различных параметрах систем регистрации. Точность преобразования колебаний среды в электрический сигнал с помощью электродинамических сейсмоприемников, имеющих разброс по различным характеристикам в пределах до первых единиц процентов, изменение некоторых их параметров от температуры окружающей среды и предельного угла наклона, не зависит прямо от системы передачи. Гораздо важнее то, насколько тщательно (т. е. по всем параметрам в диапазоне рабочих температур и углов наклона) они подобраны в установке и с какой точностью контролируются.

В то же время анализ публикаций характеристик аппаратуры для ВСП позволяет обратить внимание на то, что некоторые разработчики игнорируют требования рекомендаций [11]. В частности, это характерная особенность продукции ВНИИГИС. А то, что по данным [2], от применения системы контроля отказались заказчики ЦСК-18, вызывает недоумение. Ведь именно применение эффективной системы контроля является гарантией получения достоверной информации.

## ВЫВОДЫ

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Цифровые зонды не превосходят существенно зонды с ВИМ по числу каналов. Применение периода дискретизации сигнала меньше 1 мс при поисках нефти и газа не имеет смысла.

2. Для того чтобы цифровые зонды обеспечивали передачу и регистрацию сейсмического сигнала с мгновенным динамическим диапазоном 80–90 дБ и, таким образом не уступали, а может быть и превосходили известные образцы с ВИМ по этому параметру и чувствительности, их АЦП должен состоять из 22–24 разрядов.

3. Основная причина, по которой, как правило, число разрядов АЦП в цифровом зонде меньше 22, – низкая пропускная способность кабеля, ограничивающая скорость передачи.

4. Поскольку при длине кабеля больше одного 1 км цифровые зонды ни по одной из характеристик не превосходят зонды с ВИМ, то их заявляемые преимущества можно считать мнимыми. Реально их достоинства заключаются в простоте общей схемы и простоте разработки построением схем из микросхем с большой степенью интеграции, потенциально более высокой надежностью и т. д.

5. Поскольку пропускная способность кабеля в значительной степени зависит как от его длины, так и от ряда других факторов, применение системы контроля АЧХ каналов необходимо для всех типов зондов, а для цифровых зондов еще и линии связи.

6. Основная цель перехода от однокомпонентного ВСП к многокомпонентному заключалась в обеспечении возможности регистрации с заданной точностью вектора поляризации падающей волны. Очевидно, что разработчики, не оснащая свои зонды системами встроенного контроля, не могут гарантировать выполнение этого условия в диапазоне рабочих глубин и температур, а значит, создают предпосылки для дискредитации метода.

### Литература

1. **Багмут В.А., Багмут А.В., Рюмин В.А.** О чувствительности, динамическом диапазоне и глубине применения сейсмической скважинной аппаратуры ПМ ВСП // Технологии сейсморазведки. 2008. № 1. С. 99–107.
2. **Чигрин А.Д.** К вопросу о динамическом диапазоне и использовании времяимпульсной модуляции в методе ВСП // Технологии сейсморазведки. 2010. № 4. С. 91–95.
3. **Интернет** сайт УКРГГРИ. Цифровая регистрирующая аппаратура для вертикального сеймопрофилирования ЦРА-ВСП-3Б-1Р: [www.geotech.ucoz.com/index/cra/0-6](http://www.geotech.ucoz.com/index/cra/0-6).
4. **Гришин И.В., Рейзман В.И., Савичев Г.А.** О динамическом диапазоне аппаратуры для региональных сейсмических исследований и возможностях его увеличения // Геофиз. аппаратура. 1986. № 85. С. 34–39.

5. **Кондратьев О.К.** Теоретические основы цифровой записи сейсмических колебаний. М.: ВНИИГеофизика, 1992. 67 с.

6. **Сейсморазведка:** Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. М.: Недра, 1981. С. 165–169.

7. **Геофизические** методы исследования скважин: Справочник геофизика / Под ред. В.М. Запорожца. М.: Недра, 1983. 591 с.

8. **Мамлеев Т.С., Давыдов А.В.** Импульсная пропускная способность каротажных кабелей // Изв. УГГГА. Сер.: Геология и геофизика. 2002. Вып. 15. С. 155–166.

9. **Дэвис Дж., Карр Дж.** Карманный справочник радиоинженера. Изд. дом ДОДЭКА-XXI, 2002. 544 с.

10. **Пенин П.И.** Система передачи цифровой информации: Учеб. пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1976. 368 с.

11. **Методические** рекомендации по применению поляризационного метода сейсмической разведки / Под ред. Е.И. Гальперина, Л.А. Певзнера. Алма-Ата: КазВИРГ, 1984. 181 с.

12. **Временное** дополнение к Инструкции по сейсморазведке: Порядок, состав и форма представления первичных материалов полевых сейсморазведочных работ в Государственный банк цифровой геологической информации. М.: ГлавННВЦ, 1996. 82 с.

### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*БАГМУТ Виталий Алексеевич* – директор ЧП “Геофизприбор”, г. Симферополь.

Сфера интересов: разработка сейсмической скважинной аппаратуры.

E-mail: [bagmut@bk.ru](mailto:bagmut@bk.ru)

*РЮМИН Виктор Анатольевич* – главный геофизик, группа компаний “НАДРА”, ЧАО “Геофизическая компания “НАДРА”, г. Киев, Украина.

Сфера интересов: скважинная сейсморазведка, 3D сейсморазведка, комплексирование данных наземной, скважинной сейсморазведки и ГИС. Адрес: 03113, пр. Победы 64, кв. 118, г. Киев, Украина.

*БАГМУТ Александр Витальевич* – главный метролог КГФЭ “Крымгеофизика”, г. Симферополь.

Сфера интересов: обеспечение единства измерений в сейсморазведке, инженерно-сейсмометрические наблюдения. E-mail: [geophys@sf.ukrtel.net](mailto:geophys@sf.ukrtel.net)