



## К ВОПРОСУ О ДИНАМИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ В МЕТОДЕ ВСП

В журнале “Технологии сейсморазведки” № 1 за 2008 г. опубликована статья В. А. Багмут, А. В. Багмут и В. А. Рюмина “О чувствительности, динамическом диапазоне и глубине применения сейсмической скважинной аппаратуры ПМ ВСП”, основной смысл которой сводится к трём положениям:

1. Всем известной революции в ВСП, связанной с переходом к цифровым скважинным приборам, в действительности не было. Были две других: одна - связанная с применением современных сейсмостанций, вторая - с применением компьютера для контроля и управления сбором данных.

2. Динамический диапазон (ДД) цифровых скважинных приборов других разработчиков на несколько порядков меньше, чем заявлено в технических характеристиках, недостаточен для получения качественного материала, и, следовательно, они дезинформируют заказчика.

3. Скважинный прибор с системой передачи время-импульсной модуляции (ВИМ), разработанный авторами (аналоговый способ), не уступает цифровым приборам, имеет достаточный ДД и, кроме того, превосходит цифровые по термостойкости.

В доказательство приводятся пространственные, но слабо логически структурированные рассуждения с частыми пересчётами характеристик, многочисленные данные, часто не имеющие отношения к вопросу, сравниваются устройства, совершенно несравнимые. Скажем, сравнение уровня шумов принято проводить по характеристикам, приведённым к входу усилителя. В статье сравнение ведётся по элементу, расположенному в глубине сейсмического тракта, - входу АЦП. Такой подход предопределил громоздкость рассуждений. Приходится использовать семь определений динамического диапазона, что затрудняет восприятие материала даже для узкого специалиста.

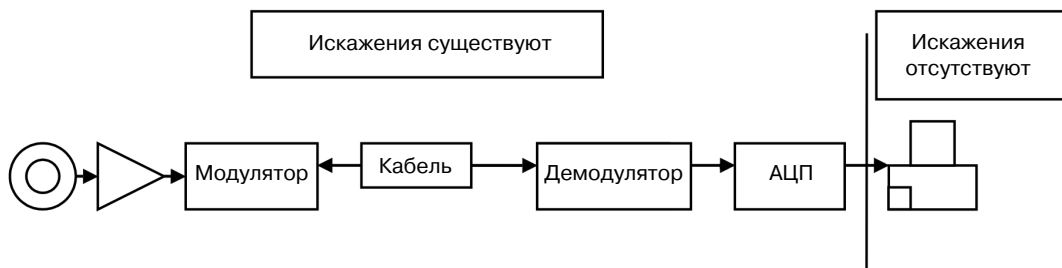
Непонятна цель сравнения характеристик цифровых скважинных приборов с наземными сейсмостанциями.

Сравнивать устройства, кардинально различающиеся по назначению, техническим требованиям, структуре и условиям работы - операция в принципе некорректная и вполне бессмысленная. Скважинный прибор может включать часть функциональных блоков, характерных для сейсмостанции, а часть включать не может. Сейсмостанция также может включать часть функциональных блоков, характерных для цифрового прибора, но часть точно не включает и не может включать. То обстоятельство, что аналоговые скважинные приборы требуют для работы сейсмостанции, говорит о том, что эти устройства могут быть разными функциональными блоками одной измерительной системы. В таком случае сравнивать их - примерно как сравнивать колеса одного велосипеда с педалями другого.

Интересно и то, что прибор собственной конструкции авторы в сравнительный анализ не включили. Для доказательства его преимуществ отведено отдельное место. И сравнивается он не с конструкциями, присутствующими на рынке, а с собственной разработкой авторов, имеющей непонятно низкие характеристики.

Не более понятно и проведение авторами объёмного исследования характеристик цифровых скважинных приборов. Они изложены в рекламных проспектах и публикациях [3 - 5]. Разработчики и те, кто это оборудование эксплуатирует, не делают секрета из его характеристик. Если какие-то данные и способы их проверки вызывают сомнения, можно связаться с разработчиками: адреса электронной почты известны. Тогда как авторы статьи, исходя из ложных предположений, приходят к несоответствующим действительности выводам.

**Пункт 1. О революции.** Она, безусловно, была, и до сих пор этот факт не вызывал ни у кого сомнения. Она заключалась в том, что были исключены искажения сигнала при прохождении его по каротажному кабелю. Что оцифровано в АЦП, то и зарегистрировано наземным регистратором. Это радикально, на несколько порядков, повысило качество (точность, динамический



**Схема 1.** Измерительная система с аналоговой системой передачи данных: для ВИМ - модулятор-демодулятор, для прямой передачи сигнала по кабелю “модулятору” соответствует кабельный усилитель, а демодулятору - корректирующий фильтр

диапазон) регистрируемого материала. Кроме того, оцифровка сигнала в скважине позволила радикально повысить канальность и период дискретизации.

Смысл этой революции нетрудно понять из приведенных аналоговой и цифровой схем получения и передачи данных. Конечным блоком сейсмического тракта, вносящим искажения в измеряемый параметр, служит АЦП. Как нетрудно заметить, в схеме аналогового прибора таких блоков на три (в два раза) больше. Но из этого вовсе не следует, что такая схема вносит искажения также в два раза большие. Кабель и подключаемые к нему элементы системы передачи данных в аналоговом варианте вносят на несколько порядков большие искажения, чем остальные (детектор, предварительный усилитель, АЦП).

“Чемпионом” по величине искажений была, разумеется, система с прямой передачей данных по кабелю. С ней всё понятно, и её рассмотрение никому не интересно. ВИМ, наряду с другими аналоговыми системами кодирования, использовалась ещё в первой половине прошлого века. Однако с развитием цифровой техники она была почти полностью вытеснена импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), предназначенной для передачи цифровых данных, именно по причине высокого уровня искажений (низкой надёжности) и узкого ДД.

Когда цифровые технологии были недостаточно развиты, ВИМ рассматривалась в ВСП как альтернатива и непосредственной передаче сигнала по кабелю, и оцифровке сигнала в скважине. Эту схему использовали в 90-х гг. разработчики из Новосибирска, но в настоящее время от неё отказались.

Причины этого понятны. Во-первых, модулятор и

демодулятор имеют конечную точность, т. е. погрешности передачи неизбежны. В то время как цифровая передача никаких искажений не вносит. ВИМ, безусловно, обладает определёнными преимуществами перед прямой передачей по кабелю, но существенно уступает цифровым системам.

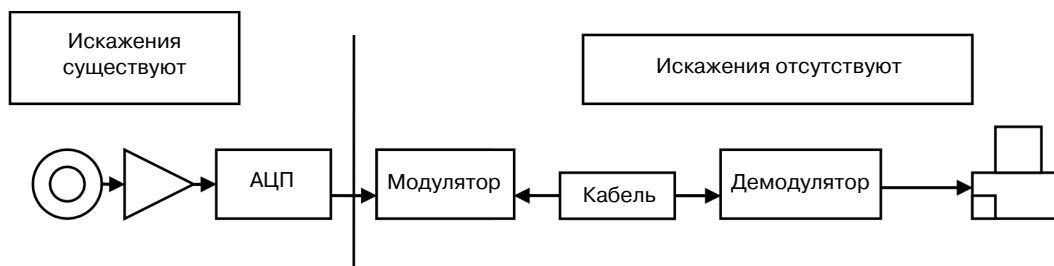
Во-вторых, величину этих погрешностей, зависящую от передающей среды, в данном случае - кабеля, невозможно контролировать. При цифровой передаче небольшая избыточность кода даёт четкий критерий возникновения ошибки.

В-третьих, ДД передаваемых величин довольно велик, потому что ограничен суммарной ошибкой кодирования-декодирования и совершенно несравним с ДД цифровых приборов.

Наконец, преимущества ИКМ перед ВИМ, давно теоретически доказанные ещё Шенноном и Котельниковым, никем пока не опровергнуты. На эту тему существует достаточно литературы, и прежде чем утверждать обратное, было бы полезно опровергнуть существующую теорию.

Те две революции, которые считают подлинными авторы статьи, имеют смысл только для ВИМ-аппаратуры. Для цифровых скважинных приборов они неактуальны. Этого авторы, похоже, не осознают. Об этом свидетельствует их замечание: “Анализ чувствительности и динамическому диапазону аппаратуры для ВСП посвящено несколько работ [7, 8, 9], но в них не учитываются в полной мере свойства регистраторов”.

Регистратор в комплексе с цифровым зондом не является существенной частью измерительной системы и не влияет на динамический диапазон. Его функция



**Схема 2.** Измерительная система с передачей данных посредством ИКМ (цифровой скважинный прибор)

сводится к дешифрации данных, поступающих из скважины, и записи их на диск. Существенны лишь модем и записывающее устройство, остальное - архитектурные излишества.

Конечно, применение компьютеров существенно повысило мобильность систем сбора данных, удобство работы операторов, возможности контроля и документирования полученных данных. Однако оно не внесло в измерительную систему изменений, повышающих точность измерений. Нет в новых компьютеризованных наземных станциях ничего такого, что нельзя было бы заменить без ущерба для качества получаемого материала.

**Пункт 2. О несоответствии ДД диапазону, заявленному в технических характеристиках конкурирующих устройств.** Расчёт ДД скважинных приборов других производителей выполняется на основе необоснованных предположений. Например, при расчёте ДД сравниваемых устройств авторы исходят из того, что “максимальная амплитуда напряжения, которая может быть получена на выходе сейсмоприёмника с допустимыми искажениями, - 0,256 В”. И используют её в качестве верхнего предела регистрируемых значений. Когда же рассчитывается ДД их собственного прибора, то они исходят из максимального сигнала 5 мВ. В чём причина столь разного подхода, - не объясняется.

Непонятным моментом представляется требование обязательного выделения 7 разрядов на квантование шума, озвученное О.К.Кондратьевым [6]. На этом основании при собственной оценке ДД ЦСК-18 эти необходимые, по их мнению, 7 разрядов элементарно вычитают из разрядной сетки, полагая, видимо, что иначе ДД рассчитать нельзя. Полученные цифры, естественно, отличаются от реальных характеристик не в лучшую сторону.

Между тем, требование 7 разрядов - мнение лишь одного из специалистов, хотя и довольно уважаемого. Существуют и иные точки зрения специалистов не менее авторитетных (Полшков-1973, 5 - 7 разрядов; Палагин-1989, 1 - 2 разряда). Более того, это требование в своё время было сформулировано на основе исследования конкретной схемы 7-разрядного МАРУ давно морально устаревшей сейсмостанции “Прогресс” и связано с недостатками её конструкции. То есть это требование не есть строго доказанная универсальная истина, такая, как, скажем, законы Шеннона или теорема Котельникова. Применять к современным цифровым приборам, не имеющим блока МАРУ или с МАРУ значительно меньшей разрядности, не имеется оснований.

На наш взгляд, при выборе разрядной сетки разработчики вправе руководствоваться своим опытом, позиционированием аппаратуры и полагаться на рекомендации тех авторов, которым более доверяют. Не стоит забывать, что любая успешная конструкция есть удачный компромисс частичного удовлетворения массы требований, принципиально несовместимых в полной мере в одном продукте. Скважинный прибор пока ещё не тот объект, где разрядность АЦП и данных можно наращивать произвольно. Каждый дополнительный разряд усложняет и

удорожает аппаратуру непропорционально. Поэтому разбрасываться ими на шум не всегда разумно и о принципе разумной достаточности забывать рано.

Разработчики скважинного комплекса ЦСК-18 за 20-летний опыт разработки в нескольких поколениях аппаратуры отводили на квантование шума от 3 до 5 разрядов. И ни разу они не слышали претензий от обработчиков на недостаточный диапазон квантования шума и, соответственно, недостаточную чувствительность аппаратуры или признаки нелинейных искажений. Кстати, к собственной ВИМ-аппаратуре авторы статьи требование пресловутых 7 разрядов на шум предъявляют весьма своеобразно.

**Пункт 3. Доказательства достаточности ДД ВИМ-прибора.** Интересно, что обсуждая технические характеристики конкурирующих конструкций, сравнивая характеристики скважинных приборов с характеристиками сейсмостанций, авторы статьи старательно обходят технические характеристики собственной конструкции.

В частности, доказывается, что “рабочий диапазон регистратора должен составлять не менее:

$$D_p = 96 \text{ дБ} + 42 \text{ дБ} = 138, \text{ или}$$

$$16 + 8 = 24 \text{ разрядов}” [1, \text{ с. } 103].$$

После чего на основе сообщения, что “разрядная сетка ЦПМЗ-1 и УКР-32, построенных с учётом этих требований”, “совпадает с числом разрядов современных 24-разрядных АЦП”, делается эффектный вывод: “Отсюда очевидно следует, что “первая техническая революция” в скважинной сейсморазведке состояла в том, что за счёт внедрения цифровых сейсмостанций была обеспечена возможность регистрации данных с мгновенным динамическим диапазоном не менее 90 дБ”. И далее маленькое добавление: “Этот диапазон обеспечивает аппаратура с ВИМ (по крайней мере, АПМ4-3 и все ее аналоги)” [1, с. 104].

В действительности же очевидно прямо противоположное: из того, что цифровая сейсмостанция обеспечивает 90 дБ, вовсе не следует, что тот же ДД обеспечивает скважинная аппаратура с ВИМ. Более того, трудно представить себе ВИМ-систему с ошибкой преобразования меньше 1 - 2% для максимальных амплитуд. И авторы этого не отрицают.

Фраза “7 разрядов АЦП” встречается в статье постоянно. Её авторы, в частности, утверждают: “если ... напряжение шума будет занимать 7 разрядов АЦП, то при подаче на вход канала сигнала с амплитудой, близкой к напряжению шума, их сумма будет преобразована 7 - 8 разрядами АЦП, а после преобразования полезный сигнал будет отделен от белого шума по частотному признаку” [1, с. 103]. Ну очень хочется и на шум 7 разрядов отвести, и сигнал в те же 7 разрядов записать!

Отделить сигнал от шума по частотному признаку легко, если они разнесены по частоте. Однако у белого шума спектр, как известно, сплошной и равномерный, т. е. полностью перекрывает частотный диапазон сигнала. По теории оптимального приёма, АЧХ оптимального входного фильтра должна совпадать со спектром

ожидаемого сигнала. Поэтому спектр сейсмического сигнала, как правило, занимает большую часть частотного диапазона аппаратуры - в расчёте на него она проектируется. Соответственно, рассчитывать с помощью фильтрации существенно снизить уровень шумов, не отфильтровав при этом спектральные составляющие полезного сигнала, наивно. Тем более что и оценка спектра самого сигнала в таких условиях крайне ненадёжна.

Но дело не в этом. Описанный случай (сигнал на уровне шума) всегда считался явной некондицией, браком. Можно, конечно, обсудить способы извлечения из некондиционного материала хоть какой-то полезной информации, но тема публикации заявлена совсем другая. Кроме того, это дело обработчиков - у них для этого теория, программные средства, опыт. Дело разработчиков аппаратуры - добиваться того, чтобы такие ситуации случались как можно реже, а не учить обработчиков из них выкручиваться.

Следующее утверждение: “Если на вход сейсмостанции поступит полезный сигнал с амплитудой, соответствующей 7 младшим разрядам АЦП, и помехой, значительно превышающей его, то и тогда может быть найдена возможность их разделения, например за счет повышения соотношения сигнал-помеха при накоплениях, или по другому признаку” [1, с. 103]. Ещё лучше! И снова попытка втиснуть сигнал в 7 разрядов, которые в других системах, по мнению авторов, должны быть отведены исключительно на шум.

Если сигнал не превышает уровень шума, значит, не существует критериев, по которым можно было бы принять решение, какая часть суммарного напряжения относится к сигналу, а какая к шуму. Поэтому, когда авторы говорят “по другому признаку”, хотелось бы поконкретнее услышать, какой именно признак имеется в виду.

Что касается накопления. Вещь это, безусловно, эффективная и полезная. Но не дешёвая. А главное - это средство методическое, используемое с любой аппаратурой при необходимости компенсировать слабость её технических характеристик, и оно никак не может рассматриваться в качестве средства улучшения этих самых характеристик. Накопление позволяет понизить уровень шумов и величину ошибки относительно *возможностей аппаратуры*. И чем ниже эти возможности, тем чаще возникает необходимость в накоплении.

В принципе, накопление может дать приемлемую точность даже при бинарном квантовании (регистрация одного знакового разряда) [7]. Вопрос в числе накоплений. Ссылаться на возможности, которые даёт накопление, значит признавать слабость технических характеристик приборов. Между тем в другой своей работе авторы утверждают: “динамический диапазон регулируется управлением источниками возбуждения, числом накоплений, например” [2]. И это в значительной мере вносит ясность в вопрос: каким образом получаются характеристики, противоречащие на первый взгляд законам физики.

В доказательство высоких технических характеристик ВИМ-комплекса в публикации приводятся профи-

ли ВСП и благоприятные отзывы о качестве материала. Все это понятно, но ничего не доказывает. Приведённый профиль представляет коррелограмму со СВИП-сигналом, полученную, к тому же, с накоплением, и отзывы получены на тот же материал.

Корреляция и накопление, как известно, процедуры статистические. Как всякие статистические процедуры, они нивелирует ошибки случайного процесса, и, следовательно, могут существенно повысить точность замеров и ДД конечного результата, если он изначально невысок. Возможно материалы, полученные ВИМ-системой, имеют относительно высокое качество именно благодаря использованию свип-источника в совокупности с накоплением, а с другими источниками и (или) без накопления будут выглядеть бледнее.

С другой стороны, теоретический предел ДД СВИП-коррелограммы не превышает 46 дБ. Соответственно, более широкий мгновенный ДД для аппаратуры, используемой со СВИП-источником, не имеет смысла. И уж тем более эти сейсмограммы нельзя принимать в качестве доказательства наличия у аппаратуры ДД 90 дБ.

Нетрудно заметить, что “7 разрядам” авторы придают более важное значение, чем просто точности оцифровки шума. Они вводят даже новую единицу измерения - “мгновенный динамический диапазон, приведённый к 7 разрядам” [1, с. 103]. И этот смысл, как нам кажется, нетрудно разгадать. Вспомним, что ошибка ВИМ-преобразования составляет не менее 1% от максимальной амплитуды. То есть отношение максимального переданного сигнала к минимальному не принимает значения больше 100 - 120. А это те самые семь разрядов. Именно эти разряды составляют, по-видимому, мантиссу регистрируемого слова данных. Соответственно, мгновенный ДД никак не может составлять 90 дБ, а максимум 36 - 42, сколько бы не обеспечивала сейсмостанция. Более того, на малых амплитудах абсолютная величина ошибки не уменьшается. Следовательно, относительная ошибка растёт пропорционально падению амплитуд. В этом и состоит принципиальный и неисправимый недостаток ВИМа по сравнению с цифровым зондом.

На “Гальперинских чтениях-2007” В. А. Рюмин докладывал о таком формате данных с 7-разрядной мантиссой и длинным порядком (в тезисы это не включено). И это подтверждает наши догадки. В этом случае становится понятным, что 7 разрядов, о которых упоминается в работе [6], и требование их выделения под шум в цифровых системах не имеют отношения к 7 разрядам, которые используются для оцифровки сигнала ВИМ-системы.

Понятно и то значение, которое придают авторы использованию компьютера, вообще (это объявлено второй революцией в ВСП!), и постоянного контроля АЧХ, в частности. Сложные аналоговые схемы трудно поддаются стабилизации, их характеристики со временем и температурой “плывут”. Соответственно, постоянный контроль параметров жизненно необходим. Применение компьютера, дающего для этого реальную и довольно простую по реализации возможность, становится находкой, на грани технической революции.

В этом отношении цифровой зонд обладает существенным преимуществом: единственный элемент аналогового тракта в цифровом зонде - усилитель. Создание высокостабильного усилителя серьёзных трудностей не представляет. Входной каскад содержит минимум частотно-зависимых элементов.

В скважинном зонде ЦСК-18 усилитель обеспечивает входной шум величиной 17 нВ в полосе частот 5 - 250 Гц, не требуя контроля АЧХ. Изначально такой контроль в конструкцию был заложен. Однако по многолетнему опыту эксплуатации не было замечено случаев изменения характеристик. Поэтому сейчас данная возможность практически не используется и рассматривается как рудиментарная. По той же причине эта "революция" не была замечена разработчиками цифровой аппаратуры.

Таким образом нетрудно заметить, что переписывание "революционной истории" ВСП предназначено для того, чтобы свести её к "открытиям", связанным с ВИМом и построенном на нём скважинном комплексе конкретных разработчиков. Ну что ж, у каждого свой взгляд на историю.

В заключение стоит заметить: ВИМ - это способ передачи сигнала по кабелю, тип модуляции - не более того. В этом может не быть единственное, но основное принципиальное отличие системы сбора данных, рекламируемой авторами, от остальных присутствующих на рынке. Соответственно, имеет смысл сравнивать его с аналогичным функциональным блоком цифрового зонда - цифровой телеметрией, и анализировать в первую очередь ДД передаваемых данных, скорость передачи, стабильность характеристик и уровни различных искажений, которые у ВИМа, как у всякой аналоговой системы, далеко не нулевые. Чувствительность, характеристики АЦП и регистраторов, количество разрядов на квантование шума, характеристики сейсмостанций и регистраторов, о которых так много говорится в статье, к ВИМу отношения не имеют. Это отдельные темы, и обсуждать их следует отдельно. Тогда обсуждение будет короче и предметней, а путаницы - меньше.

Кстати, утверждение авторов: "Разработчики ЦСК-18 допускают, что при этом (передаче цифрового кода - авт.) возможны потери информации" [1, с. 107], не соответствуют действительности.

К сожалению, данная статья, как и та, ответом на которую она является, содержит немало предположений и догадок. Это не наш стиль. Но это вынужденная форма реакции: слишком мало реальной информации о конструкции, слишком явно заявленные характери-

сти аппаратуры превышают теоретические возможности (противоречат законам физики). Было бы больше информации об особенностях конструкции - было бы меньше простора для фантазии и необходимости в предположениях.

Авторы статьи обижаются: "Таким образом, ставятся под сомнение результаты исследований ПМ ВСП, выполняемых аппаратурой с ВИМ, сама аппаратура, возможно, относится к разряду морально устаревшей, а направление разработок - к бесперспективному" [1, с. 99]. Так нужен ли ВСП ВИМ? Это не нам решать! У него есть своя ниша - значит, пока нужен. Пока термостойкость цифровых конструкций не позволяет им работать на "горячих" скважинах, ВИМ, очевидно, будет востребован.

Перспективен ли ВИМ? Если завтра появится цифровая элементная база высокой термостойкости, ВИМ может потерять актуальность, как потеряли её многие другие технологии, популярные в прошлом. Но это опять таки не от прогнозов зависит. Не стоит насильственно выживать с рынка конкурирующие конструкции.

Однако все участники рынка должны обладать полной и достоверной информацией о возможностях и характеристиках предлагаемых технических решений. Способы проталкивания на рынок изделия, основанные на искажении информации, сами по себе вселяют глубокие сомнения в его перспективах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Багмут В. А., Багмут А. В., Рюмин В. А., 2008, О чувствительности, динамическом диапазоне и глубине применения сейсмической скважинной аппаратуры ПМ ВСП: Технологии сейсморазведки, 1.
2. Багмут В. А., Сайганов А. Э., Рюмин В. А., 2002, О проблемах аппаратуры для ПМ ВСП: Гальперинские чтения-2002: М., ЦГЭ.
3. Виноградов Е. А., Чигрин А. Д., 2005, Порог чувствительности аппаратуры ВСП: Технологии сейсморазведки, 3.
4. Виноградов Е. А., Усов И. Н., Чигрин А. Д., 2006, Динамический диапазон аппаратуры ВСП ЦСК-18: Гальперинские чтения-2006: М., ЦГЭ.
5. Виноградов Е. А., Антипин Ю. В., Торцев А. В., 2006, Скважинная телеметрия: Технологии сейсморазведки, 2.
6. Кондратьев О. К., 1992, Теоретические основы цифровой записи сейсмических колебаний: М., ВНИИгеофизика.
7. Палагин В. В., Попов А. Я., Дик П. И., 1989, Сейсморазведка малых глубин: М., Недр.
8. Сирченко В. В., Багмут В. А., Сайганов А. Э., Рюмин В. А., 2004, О свойствах систем передачи, применяемых в аппаратуре для ПМ ВСП: Гальперинские чтения-2004: М., ЦГЭ.

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Анатолий Дмитриевич ЧИГРИН* - старший научный сотрудник ООО "НИИМоргеофизика-Интерсервис".