

Вибро-ВРС на рудном поле (Методика полевых наблюдений высокоразрешающей вибрационной сейсморазведки на рудном поле)

■ Колесов С.В., Кузин А.М., Кондрашков В.В.

Аннотация. На одном из рудных полей выполнены сейсмические работы по методике высокоразрешающей вибрационной сейсморазведки (ВРВС), включавшей плотную систему наблюдений, использование высокочастотных вибраторов и нелинейно-частотно модулированных свип - сигналов. Это позволило получить исходный полевой сейсмический материал с заданной шириной рабочей полосы частот – до 160Гц с высоким отношением сигнал/помеха на всех частях профиля при довольно заметном изменении условий возбуждения.

Введение

Сейсморазведка большей частью используется для поисков и разведки месторождений углеводородов и в значительно меньшей степени – для рудных объектов. Для месторождений углеводородов доминирующим является структурный фактор; для рудных он имеет подчинённое значение. На первый план выходит задача определения зональности упруго-деформационных свойств.

Наибольшее число месторождений углеводородов размещается в осадочных породах и представлено структурными ловушками, имеющими «покрышку», непроницаемую для поднимающихся углеводородных флюидов и «коллектор», в котором могут накапливаться углеводороды. Границы коллекторов отображаются на сейсмических разрезах в виде достаточно пологих осей синфазности; они, как правило, связаны с изменениями условий осадконакопления отложений. Только в последнее время в связи с повышением разрешающей способности сейсморазведки стали отслеживать и изучать структуры, подстилающие резервуары, например зоны интенсивной или прозрачной сейсмической записи, воздействие которых возможно приводит к накоплению флюидов.

Рудная минерализация образуется при флюидной проработке вмещающей среды. Поэтому зона оруденения, точнее зона измененных вмещающих пород в результате воздействия флюидов уже не имеет таких относительно чётких сейсмических границ, как обычная залежь углеводородов, хотя тоже находит отображение в свойствах сейсмического волнового поля [2, 5]. Месторождения углеводородов в основном расположены на глубинах 1-3 км, тогда как рудные – на глубинах до 1,5 км от дневной поверхности. Помимо этого залежи углеводородов и руд, как правило существенно различаются по своим размерам. Отсюда следуют определённые различия в методиках полевых сейсмических работ и обработки. Если для месторождений нефти и газа, образующихся обычно в осадочных толщах, пригодны пластовые модели среды, то рудным месторождениям больше соответствуют гетерогенные сейсмические модели [2, с.98-106]. Глубины расположения рудных объектов, размеры и характер их строения приводят к специфике методики высокоразрешающей сейсморазведки.

Одной из задач описываемых работ было исследование возможностей использования современной высокоразрешающей сейсморазведки для оценки мощности вулканогенно-терригенных и

терригенных отложений, перекрывающих и включающих колчеданосные комплексы.

Полевая методика высокоразрешающей сейсморазведки основана на возбуждении и регистрации сейсмических колебаний с расширенным в стороны низких и высоких частот спектром. При этом предполагается, что широкой должна быть именно рабочая («активная» или «эффективная») полоса частот сейсмической записи, там, где полезный сигнал превышает помеху в заданное число раз [7].

Частотный состав отраженного сигнала напрямую связан с разрешающей способностью сейсмических работ по глубине и латерали. Обычно разрешённость по глубине оценивается через длину волны сигнала $\lambda = V/F$ (V – скорость в среде, F – средняя частота сигнала) в настоящее время – как $\lambda/8$. Латеральная разрешённость Dr – расстояние между разделяющимися по латерали объектами оценивается (Голосов В.П., 2001г.) как одна треть 1й зоны Френеля, $Dr = 0.3 \cdot (\lambda h_0)^{1/2}$, где h_0 – глубина разделяемых объектов.

Исходя из априорной сейсмической модели согласно проекту работ были взяты следующие параметры системы наблюдений:

- регистрация: шаг пунктов приёма – 12.5м, шаг пунктов возбуждения – 25м, число каналов – 240, длина косы – 3км, центральная система наблюдений;
- отработка профиля по методу многократных перекрытий с кратностью 60 производится телеметрической сейсмостанцией I/O-2.
- возбуждение: два вибратора СВ-14/150 МТК (высокочастотный вариант), стоящих последовательно встык друг с другом на ПВ (база группирования – 10м); возбуждаемые частоты – от 10Гц

до 160Гц.

Для уточнения проектных параметров возбуждения был проведен цикл опытных работ, первоначально с ЛЧМ (линейными) свипами – всего 98 вариантов, а затем – с НЧМ (нелинейными) свипами ещё – 11 вариантов.

1. СЕРИЯ ОПЫТОВ – С ЛИНЕЙНЫМИ (ЛЧМ) СВИПАМИ

Большой объём опытов с ЛЧМ свипами был проведен для того, чтобы затем использовать эти выводы для планирования и проведения серии опытов с НЧМ свипами. Помимо сейсмограмм просматривались силовые характеристики: АЧХ, при ЛЧМ свипе соответствующие АЧХ действующей силы, а также спектры ошибок фазы для обоих вибраторов в зависимости от установочного значения прижима.

В опытах менялись параметры свип-сигналов, линейных и нелинейных, сила «прижима», параметры групп вибраторов и число накоплений, а также характер грунта («мягкий» (суглинок, чернозём) и «жесткий» (асфальт, скальный грунт)).

Анализ результатов опытов с ЛЧМ свипами, позволил рекомендовать следующие параметры: ЛЧМ свип 20 – 160Гц/12с, конуса по 0.5с, при 2-х вибраторах и би накоплениях на ПВ; сила «прижима» $P = 65\%$ от максимума.

Выводы первой серии опытов

1) Необходимо уменьшение «прижима» P до 50% для уменьшения разброса силы, её фазы и коэффициента гармоник относительно прижима в 65%, что даст возможность расширить диапазон частот свипов от 10 до 170Гц.

2) Энергия свипа для НЧМ свипов должна быть уменьшена преимущественно на относительно низких частотах – до 70Гц, за счёт увеличения там скорости

частотной развертки, Например, на частоте 25 – 30Гц – в 2-3 раза по сравнению с ЛЧМ свипами.

3) Необходимо увеличить энергию возбуждения на частотах свыше 70 Гц за счёт увеличения общей длительности свипа (времени Т) и частичной перекачки энергии с низких частот на относительно высокие с помощью выбора соответствующего значения коэффициента «нелинейности» «О».

2.ВТОРАЯ СЕРИЯ ОПЫТОВ – С НЕЛИНЕЙНЫМИ (НЧМ) СВИПАМИ

2.1. Вторая серия опытов проводилась для выбора параметров нелинейных свипов вида. Опыты выполнялись на мягком грунте, где наблюдается более сильное затухание высокочастотных составляющих сейсмического сигнала по сравнению с твёрдым грунтом.

2.2. Комментарии к выбору параметров НЧМ свипов

2.2.1 Цель выбора параметров НЧМ свипов: обеспечить во всём диапазоне возбуждаемых частот такие значения отношения сигнал/ помеха, чтобы все эти частоты присутствовали бы в спектре временного разреза МОГТ на временах до 1с.

2.2.2 Был использован свип вида децибел-на-октаву, как наиболее часто используемый и имеющийся на БУСВ.

2.2.3 Основные задачи выбора параметров НЧМ свипов были следующие:

- добавить (по сравнению с ЛЧМ свипом) энергию на высокие частоты (более 65 70Гц) за счёт увеличения длительности свипа Т и частичной перекачки энергии с низких частот;

- уменьшить энергию (явно излишнюю при ЛЧМ свипе) на низких частотах, ослабив тем самым уровень низкочастотных помех, при сохранении качества прослеживания осей синфазности на

низких частотах.

2.2.4 При рекомендуемой величине прижима $P = 65\%$ (силы в % от максимума) были сильные искажения фазовой характеристики, поэтому в дальнейшем бралась величина прижима $P = 50\%$.

2.2.5 Опыты на частотах более 160Гц показали, что один вибратор имеет завал ошибки фазы более 8° . Поэтому решено брать $F_2 = 160\text{Гц}$. Вибратор № 2 имел «образцовые» характеристики на частотах более 20Гц.

2.2.6 При выборе параметров НЧМ свипов учитывалось, что реальный частотный диапазон уже, чем «установочный».

При расчётах контролировались в основном значения F_{1p} , V_{fp} , dV_p и учитывались амплитудно – частотные и фазовые характеристики свипов,

2.2.7 После начала отработки профиля из-за ухудшения вида АЧХ и ФЧХ посылаемых свипов, был взят свип 15 – 160Гц/16с -6дБ/окт, конуса по 0.5с, работали 2 вибратора при 6 накоплениях и прижме $P = 50\%$. База группирования – 10м, т.е. стык двух вибраторов приходился на ПВ.

3. РАБОТЫ МОГТ НА ПРОФИЛЕ

При профильных работах постоянно контролировался исходный полевой материал в разных частотных диапазонах и разных предварительных усилениях. Работы проводились в основном с выбранным НЧМ свипом 15 – 160Гц/16с -6дБ/окт и только небольшая часть профиля была пройдена для сравнения с выбранным после 1_й серии опытов ЛЧМ свипом – 20 – 160Гц/12с. Использование НЧМ свипов позволило повысить разрешающую способность проводимых полевых работ. Для этого менялась фильтрация на плоттере станции. Для НЧМ свипов при фильтре 15 – 90Гц нача-

ли следиться новые чёткие оси синфазности (на временах 0.6 – 0.85с), а при фильтре на плоттере 15 – 120Гц сейсмограммы стали заметно отличаться мелкими деталями, что означало вклад энергии частот между 90Гц и 120Гц, а при фильтре 15-180Гц обнаружались значимые, но небольшие различия записей, что свидетельствует о наличии полезной энергии на частотах после 120Гц.

4. АНАЛИЗ СЕЙСМОГРАММ И ИХ СПЕКТРОВ

4.1. Анализ сейсмограмм

В полевых условиях можно оценивать только вид сейсмограмм в разных частотных диапазонах их вывода на плоттере. Спектральный анализ был проведен в камеральных условиях, но одно не заменяет полностью другое.

Сейсмограмма рис. 1, выведенная в поле, от ЛЧМ свипа 20- 160Гц/12с, с конусами- по 0.5с и прижимом $P = 50\%$ (1й серия опытов), заметно перегружена низкими частотами. Известно, что низкочастотные волны-помехи, образующиеся в ВЧР, возрастают по амплитуде быстрее, чем полезные волны более глубоких отражений, причём от этих волн-помех трудно полностью избавиться с помощью полосовой фильтрации. Гораздо более эффективный способ - это уменьшение энергии сигнала на этих частотах при возбуждении. Именно так (см.рис. 2) получается при НЧМ свипе 15-160Гц/16с – 6дБ/окт, (конуса- по 0.5с, прижим $P=50\%$). Здесь слабее энергия низкочастотной записи, в том числе волн-помех, и сейсмограмма в целом выглядит более высоко-частотной.

На рисунках №1 и №2 реальная скорость частотной развёртки $V_{fr} = 11.7\text{Гц/с}$ для ЛЧМ свипа, а для НЧМ свипа №10 - $V_{fr} = 26.6\text{Гц/с}$, то есть энергия (как обратная величина для V_{fr}) на низких частотах

у ЛЧМ свипа по меньшей мере в 2.3 раза БОЛЬШЕ, чем у НЧМ свипа.

Сравнение спектров сейсмограмм от ЛЧМ свипа (20- 160Гц/12с) и рабочего НЧМ свипа (15- 160Гц/16с – 6дБ/окт) на одном и том же ПВ (поле, мягкий грунт), приведенное на рис.3 подтверждает сравнение сейсмограмм и также оправдывает выбор НЧМ свипа для профильных работ.

Спектры сейсмограмм в сейсмогеологической обстановке, где проходил данный профиль, зависят от изменений условий возбуждения и геологии разреза. Ранее, при рассмотрении результатов 1й серии опытов с ЛЧМ свипами упоминалось, что на жестком грунте запись получается более высокочастотной. Вследствие этого сравнение спектров сейсмограмм от рабочего НЧМ свипа (15-160Гц/16с – 6дБ/окт) и ЛЧМ свипа (20-160Гц/12с, с которым отработано 6 последних километров профиля), на соседних ПВ (ПК, где проходит дорога и под плитой вибратора жёсткий грунт, не показывает такого заметного различия в форме спектра от НЧМ и ЛЧМ свипов, которое ожидалось бы по результатам сравнения спектров на «мягком» грунте (по рис. 3). На рис. 4 видно, что выигрыш у НЧМ есть, но небольшой: энергия на высоких частотах здесь все же больше, чем у ЛЧМ. Правда на низких частотах у НЧМ свипа энергия (и, разумеется, интенсивность низкочастотных волн-помех) ниже, чем у ЛЧМ, но это различие не столь значимо, как на мягком грунте.

4.2. Анализ спектров сейсмограмм

При полевых работах можно было наблюдать смену условий возбуждения: профиль проходил по степи, иногда с выходами плотных метаморфических пород, иногда на лугах и в поймах рек, по каменистому грунту, по сельхозугодьям. Соответственно менялись и условия

возбуждения вибросейсмических сигналов, что находит отражение в форме спектров зарегистрированных сейсмограмм. На рис.3 и рис.4 показаны спектры сейсмограмм ЛЧМ и НЧМ, с двух участков профиля: на мягком грунте (рис.3) и на жёстком (рис.4). И в том и другом случае на рисунках слева – спектры от ЛЧМ свипа, а справа – от НЧМ свипа.

Спектры строились в одном условном масштабе, что дало возможность сравнивать их не только по форме, но и по величине амплитуд на одних и тех же частотах.

На спектрах сейсмограмм с НЧМ свипами, чётко видна правая граница спектра (около 160Гц), тогда как на сейсмограммах с ЛЧМ свипами хорошо виден завал спектральных амплитуд высокочастотных составляющих. При этом если по спектрам первой половины сейсмограмм с ЛЧМ можно судить о высокочастотных составляющих (как и при НЧМ свипах – до 160Гц), то у сейсмограмм второй половины спектр значительно сужен со стороны высоких частот.

Близость спектров сейсмограмм НЧМ и ЛЧМ, относящихся к участку их наложения объясняется тем, что их ПВ были расположены на дороге – вибраторы работали на жёстком грунте, который благоприятен для генерации высоких частот, тогда как сейсмограммы ЛЧМ второй половины получены на мягком грунте. Вместе с тем у сейсмограмм, полученных с НЧМ свипами, рабочая полоса частот спектра - 25 - 160Гц на всех грунтах – и мягких и жёстких при относительно небольших вариациях отношения сигнал/помеха на всех частотах!

5. ВЫВОДЫ ПО МЕТОДИКЕ ПРОВЕДЕННЫХ РАБОТ

5.1. Условия возбуждения в пределах профиля довольно сильно меняются, и

чтобы обеспечить во всех частях профиля заданную ширину рабочей полосы частот – до 160Гц с высоким отношением сигнал/помеха следует подкачивать, там где это нужно, энергию свипа на высокие – более 70Гц -частоты. Подкачка на высокие частоты и частично перекачка с низких частот на высокие необходима на «мягких» грунтах и может быть уменьшена или убрана на участках профиля с «жёсткими» грунтами. Изменение параметров возбуждения целесообразно проводить по методике адаптивной вибросейморазведки ([1] - разработка ООО «ГСД»), включающей помимо алгоритмических решений ещё и аппаратные разработки (новые БУСВ - блоки управления вибраторами).

5.2. В дальнейших работах, если они будут проводиться с подобными вибраторами, с теми же блоками управления вибраторами и на сходном объекте, целесообразно использовать НЧМ свип вида «дБ/окт» в полосе частот 15 – 160Гц (и более), примерно с той же реальной начальной скоростью частотной развёртки – 25-30Гц/с, но с меньшим значением $\text{ОдБ/окт} = 5$ или 4дБ/окт . Верхняя частота определяется в зависимости от технических возможностей вибраторов, а время T – вычисляется по заданным значениям $F1, F2, V_{fp}$ и O .

5.3. Рассчитывать на «балансировку» спектра ЛЧМ свипа при работе на мягких грунтах, видимо не следует, так как в этом случае выравнивание спектра на частотах более 60 – 70Гц даст подъём уровня высокочастотных помех и не изменит исходного отношения сигнал/помеха, что нежелательно скажется на результатах интерпретационной обработки.

5.4. Метод многократных перекрытий (ММП), ориентированный, большей частью на обработку по ОГТ, благодаря отличному техническому и технологическому

кому обеспечению полевых работ, разработке и широкому распространению современных компьютерных систем обработки и интерпретации, стал как бы стандартом для решения разнообразных геологических задач с помощью сейсморазведки, несмотря на свои принципиальные ограничения. В первую очередь это - справедливость использования пластовых моделей для описания строения изучаемой среды, с углами наклона пластов до 10° - 12° . Вместе с тем для многих рудных месторождений, наличие многочисленных субгоризонтальных сейсмических границ – не характерно.

Если от ММП (Метод Многократных Перекрытий) отказываться не целесообразно, то обработку полевых данных следует модифицировать, учтя специфику решения рудных задач. Повышение разрешённости первичных полевых материалов теряет свой смысл при неадекватной полевой отработке и некачественной обработке.

Одним из способов обработки данных рудной сейсморазведки является скоростной анализ волн, преломленных на 1й жесткой границе. В методе ОГТ эти данные являются как бы побочными, но для рудных задач они могут иметь самостоятельное значение [2]. Работы МПВ заметно дешевле чем МОГТ и должны проводиться в большем объёме по площади. Вывод это далеко не нов: он относится к разряду «хорошо забытого старого».

Эффективность использования МПВ в данных условиях может быть продемонстрирована рисунком 5, где показаны результаты скоростного анализа преломленных (рефрагированных) волн на 1_й жесткой границе. Исходные данные взяты с сейсмограмм ОГТ- с одной сотой части их общего количества.

На рис.5 с ПК 1800 до ПК 2900 можно видеть зону подъёма скорости более чем

на 1км/с. Скачки скорости в районе ПК 2350 и ПК 2550 могут быть вызваны изменением геологического строения ВЧР, а также искривлением линии профиля.

6. К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ РАБОТ

Рис.6 интересен тем, что вследствие высокой разрешённости (методика ВРС - высокоразрешающей сейсморазведки, в данном случае – вибрационной), обусловленной широким спектром отрабатываемых вибраторами частот - от 20 до 160Гц (3 октавы) и при качественной обработке (оригинальный комплекс программ ПРО: «Параметрическая развёртка отражений», автор Кондрашков В.В.), на фрагменте временного разреза можно видеть множество мелких разломов, соединяющихся между собой (при рассматривании) и образующих подобие субвертикальных «трещин», по которым возможна миграция флюидов, формирующих рудное месторождение. Следует отметить, что мы здесь видим не сами трещины, а их сейсмическое отображение в данном диапазоне частот, которое близко к реальности, но по точности не соответствует действительности.

Расположение рудного месторождения в плане можно связать со скачком изменения скорости преломлено - рефрагированных волн на первой жесткой границе (рис.5) по профилю ВРС». Интерпретация скоростей ПРО (рис. № 7) может дать расположение предполагаемых рудоносных участков (белый цвет) по глубине пород сейсмического профиля.

Помимо устоявшихся способов полевых вибросейсмических работ и методик интерпретации их результатов следует обратить внимание на возможность

проявления на месте проводимых работ нелинейных сейсмических эффектов, результаты которых могут дать дополнительную информацию о строении изучаемого геологического разреза. Известно (см.[6]), что наиболее ярко нелинейные сейсмические эффекты (возникновение кратных гармонических составляющих, волн комбинационных частот и т.п.) проявляются в трещинных, пористых, проницаемых, флюидонасыщенных горных породах, как можно также охарактеризовать рассматриваемый данный геологический разрез. Разумеется, что для этого должна использоваться соответствующая методика сейсмических наблюдений (подобная той, которая описана в [6] – применительно к месторождениям углеводородов). Разумеется, что это дело будущих исследовательских работ, но важно то, что использование нелинейных сейсмических явлений можно применять и для поисков и разведки рудных месторождений, не ограничиваясь углеводородами.

Авторы благодарны руководству ОП «Спецгеофизика» за возможность анализа полевых материалов, в получении которых один из авторов принимал непосредственное участие.

Литература

1. Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. / "Недра" М. 2000
2. Караев Н.А., Рабинович Г.Я. Рудная сейсморазведка. // МПР РФ, РАН РФ, ВИРГ Рудгеофизика, М., ЗАО «Геоинформмарк» 2000.

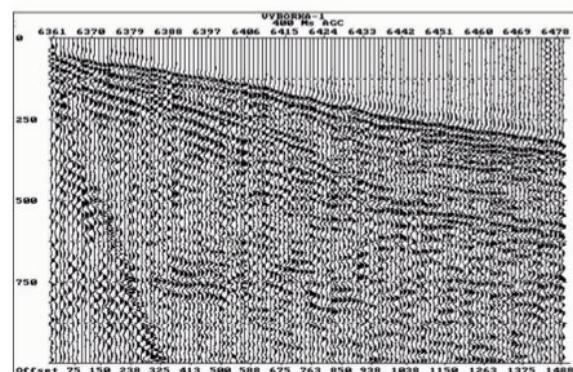
3. Колесов С.В., Потапов О.А., Иноземцев А.Н., Захарова Г.А. Использование нелинейных свипов при высокоразрешающей вибросейсморазведке. //ЕАГО, «Геофизика» № 1 2002г., стр.18-28

4. Колесов С.В., Потапов О.А. Комплекс программ для расчета реальных параметров нелинейных свипов. ЕАГО, Геофизический вестник №2, 2001г., с.18 – 21).

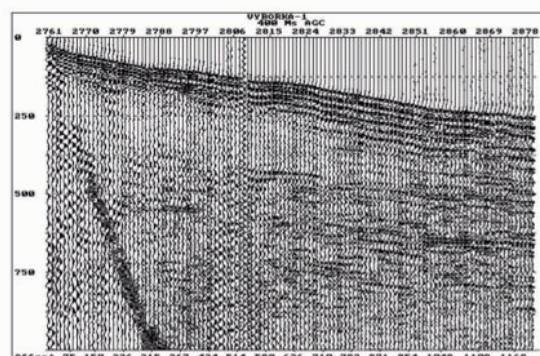
5. Кузин А.М. Разработка методики прогноза залежей флюидального генезиса по данным сейсмических методов. // «Прикладная геофизика», вып 131, М., Недра, 1994. с. 396-406

6. Логинов К.И., Жуков А.П., Шнеерсон М.Б., Логинов И.В. // Нелинейные волновые поля в акустическом каротаже и вибрационной сейсморазведке. М. 2012.

7. Харкевич А.А. //Спектры и анализ, М. ГИ ФМЛ, 1962



▲ Рис.1 Типичный пример сейсмограммы ЛЧМ свипа 20-160Гц/12с.



▲ Рис.2 Пример сейсмограммы НЧМ свипа 10(15)-160Гц/16с-6дБ/окт.

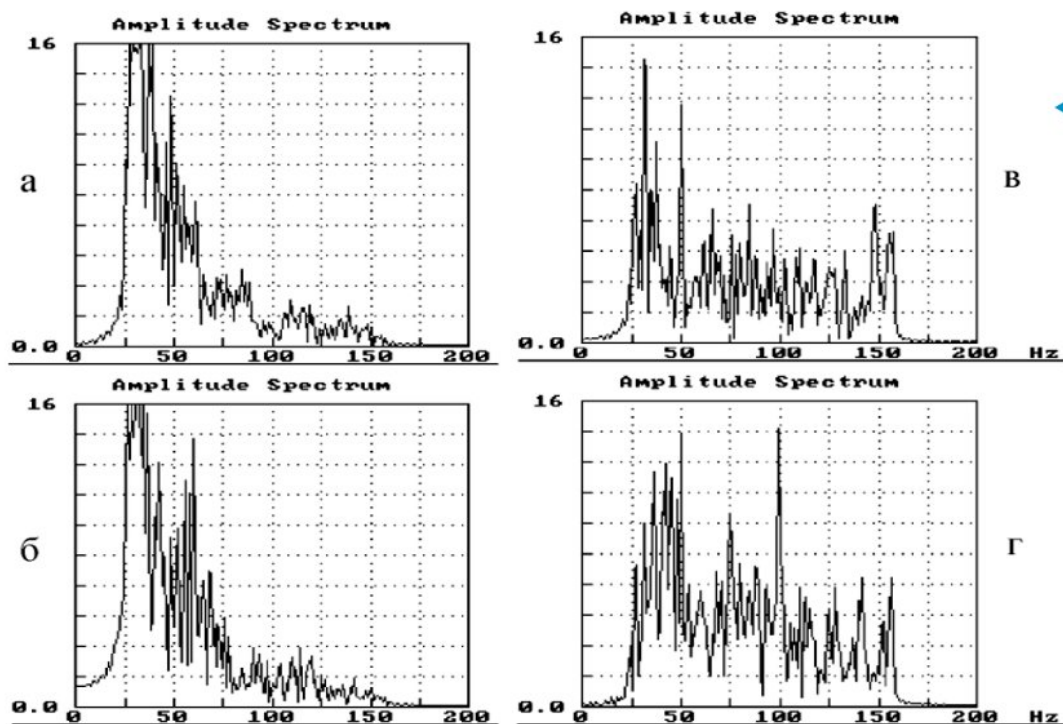


Рис.3 Спектры сейсмограмм на «мягком» грунте от ЛЧМ свипов (а,б) и НЧМ свипов (в,г).

Рис. 3

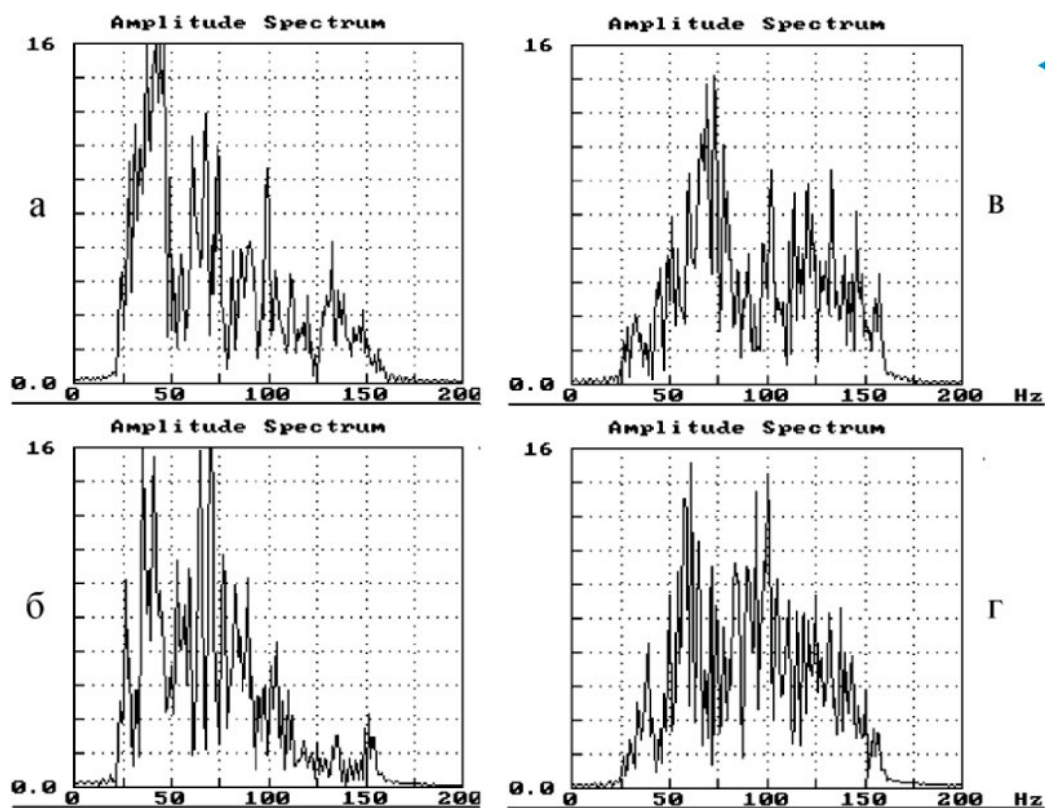


Рис. 4. Спектры сейсмограмм на жёстком грунте от ЛЧМ свипов (а,б) и НЧМ свипов (в,г).

Рис. 4

Скорости рефрагированных волн

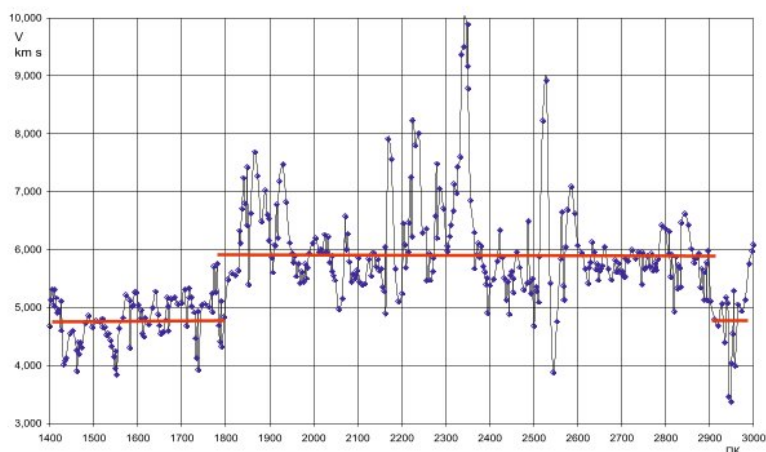


Рис. 5 Характер изменения скорости преломлено - рефрагированных волн на первой жесткой границе по профилю ВРС

Рис. 6. Фрагмент временного разреза ПРО, на котором видно изменение характера «трещиноватости» по латерали. По мере роста глубин изображения «трещин» и разломов «размываются» из-за снижения латеральной разрешённости.

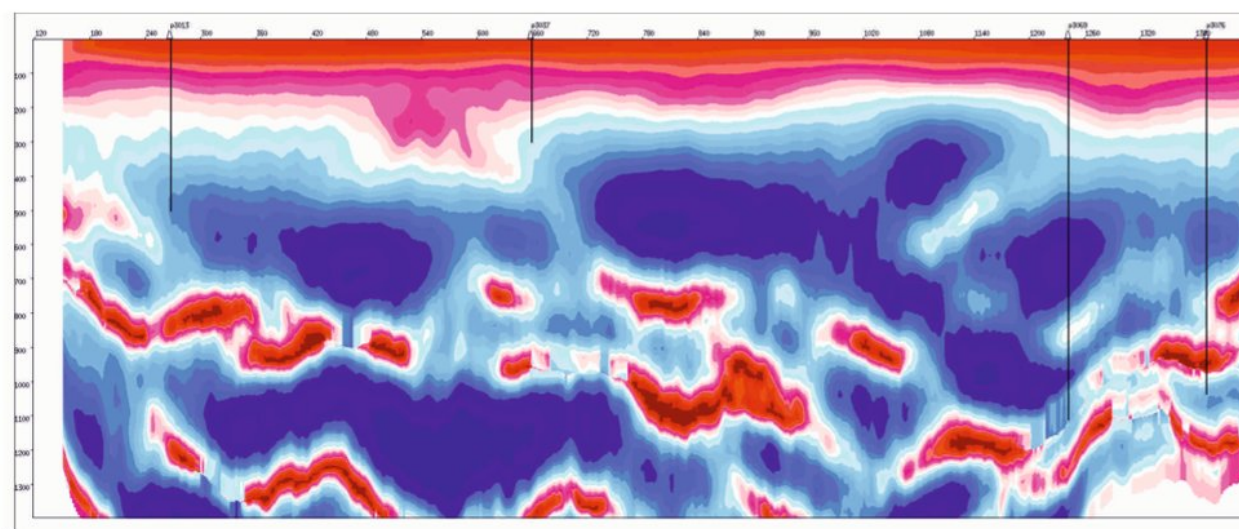
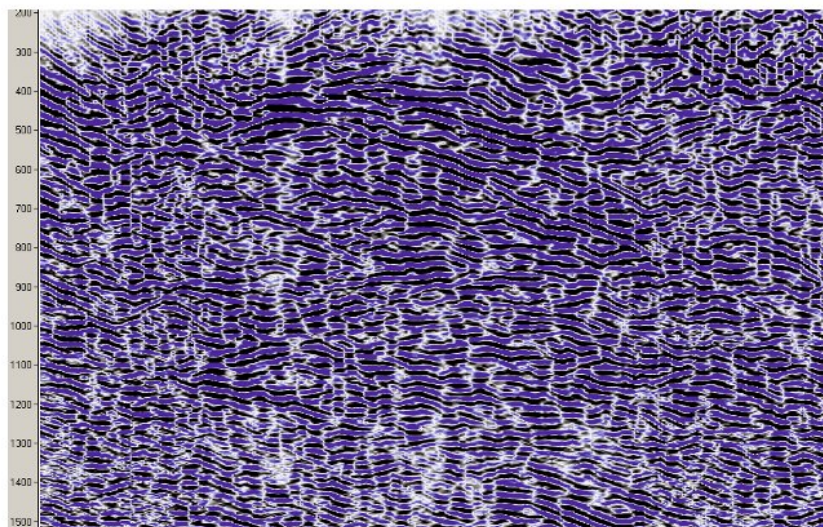


Рис. 7. Фрагмент глубинного разреза интервальных скоростей ПРО Шкала глубин дана через 100м, скорости: темно-красный цвет – 1500м/с, белый – 4600м/с, тёмно-синий – 8000м/с.