УДК 542.943

ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ВТОРЫХ ГАРМОНИК В ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ МЕТАНОУГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

А.Г. Абарбанель, Д.А. Сизиков

Московский филиал ООО «Газпром проектирование»[1]

Сведения об авторах

Евгений Григорьевич Абарбанель,
начальник отдела геофизики и геолого-промысловых исследований

Дмитрий Александрович Сизиков,
начальник отдела геологии

Традиционно при подготовке к разработке месторождений углеводородного сырья для изучения строения геологического разреза используются сейсморазведочные работы 2D МОГТ. Монотонный терригенный разрез, вмещающий угольные пласты мощностью первые метры, характерный для метаноугольных месторождений Кузбасса, и незначительная глубина залегания целевых горизонтов (до 1000 м) требуют определенных технологий проведения сейсморазведочных работ и методов обработки полученных материалов. В рамках этой работы будут предложены технологии изучения верхней части разреза импульсными, вибрационными источниками упругих колебаний и методики обработки с использованием высших гармоник частотного спектра нелинейных волновых полей, направленные на повышение разрешенности временного разреза для выбора и обоснования объектов разработки метана угольных пластов.

Ключевые слова: Кузбасс, метаноугольные месторождения, высокоразрешающая сейсморазведка, нелинейная вибрационная сейсморазведка, вторые гармоники

Проблема истощения запасов на разрабатываемых крупных газовых месторождениях заставляет сегодня говорить не только об организации добычи на удаленных месторождениях с высокой себестоимостью извлечения, но и о разработке нетрадиционных ресурсов углеводородов. Расширение ресурсной базы углеводородного сырья является важнейшей составляющей стратегии развития «Газпрома». Одно из новых для компании направлений – разработка нетрадиционных газовых ресурсов в рамках стратегии комплексного, эффективного освоения углеводородного сырья и участие в развитии регионов, традиционно ориентированных на каменный уголь, с решением спектра задач: от экологических до локально-энергетических.

В 2003 году ОАО «Промгаз» в Кузбассе начаты экспериментальные работы по обоснованию возможности промышленной добычи метана. В 2003–2004 годах пробурены и оснащены необходимым оборудованием 4 экспериментальные скважины. В этих скважинах произведены гидроразрывы пластов. К настоящему времени в Кузбассе пробурено 26 разведочных скважин. В процессе освоения скважин были проведены откачки воды, созданы депрессии на пласты и получены первые притоки метана. В процессе разведки месторождения выполнены сейсморазведочные работы с целью изучения геологического строения, построения структурных, фильтрационных моделей и проектирования разработки. При проектировании и обработке сейсморазведочных работ необходимо учитывать аномальность угольной толщи, в плане ее залегания, особенности нарушенных и трещиноватых зон, небольшую мощность угольных пластов (3–10 метров), а также перспективные глубины до 1 км с приемлемыми фильтрационными параметрами угольных пластов – коллекторов. Исходя из этой специфики, существует несколько подходов для решения данной задачи.

[1] Московский филиал ООО «Газпром проектирование»
Россия, 142700, Московская обл., г. Видное, ул. Вокзальная, д. 23

1. Применение технологии высокоразрешающей сейсморазведки с использованием взрывного источника под зоной малых скоростей (ЗМС).

Сущностью метода является возбуждение упругих волн под ЗМС из достаточно глубоких скважин с использованием малых зарядов. Глубина скважин зачастую превышает 50–80 метров, в зависимости от мощности ЗМС. Ограничением метода, несмотря на его несомненную эффективность, является дороговизна проведения полевых работ, связанная с бурением скважин возбуждения, а также экологическими ограничениями и нормами безопасности из-за использования, как правило, взрывчатых веществ в качестве источника упругих волн.

Высокоразрешющая сейсморазведка (далее – ВРС) представляет собой технологию, использующую минимизированные заряды на оптимальной глубине ниже подошвы ЗМС, а также специальные процедуры обработки (патент №2107310 [3]). На *рисунке 1* показаны полевые сейсмограммы с одной и той же физической точки, полученные с использованием взрывного источника под ЗМС, и из неглубокой скважины. Спектр полевой сейсмограммы высокоразрешающей сейсморазведки заметно шире, несколько сдвинут вправо, чем спектр традиционной сейсмограммы. Разрешающая способность сейсмограммы ВРС неоспорима. ВРС позволяет изучать и картировать тонкие особенности нефтегазовых ловушек, осложненных малоамплитудными сбросами, выделять структурные и стратиграфические несогласия и т.д. Широкое использование ВРС позволяет получать высококачественную геологическую информацию. Сейсморазведочные работы методом ВРС обнаруживают существенные отличия в геологических моделях, по сравнению с устоявшимися, в течение многих десятилетий. Ограничениями распространения технологии являются дороговизна ее проведения и экологические требования.

2. Применение технологии высокоразрешающей сейсморазведки с использованием вибрационного источника упругих волн, основанной на нелинейных свойствах распространения упругих волн в среде. Метод отличается относительной дешевизной и был реализован на метаноугольных месторождениях Кузбасса.

Теоретические обоснования и суть подхода расширения спектрального состава регистрируемых колебаний с использованием вибрационного источника упругих волн

Отметим также и то, что вибрационная сейсморазведка развивалась, в основном, на базе линейной теории процессов, протекающих при возбуждении и распространении волн в реальных средах. Наблюдаемые при этом нелинейные искажения вибросигналов относились к помехам и исключались из процесса обработки получаемых данных. Однако показано, что возникающие в процессе работы вибраторов нелинейные волны (гармоники и субгармоники) несут с собой полезную информацию, представляющую интерес для целей разведки. Это обосновывает тезис о том, что развитие и совершенствование вибрационной сейсморазведки возможно лишь на основе привлечения новых, в том числе нестандартных, оригинальных идей и решений.

В основе нелинейной вибрационной сейсморазведки лежат следующие основные положения:

- нелинейный характер взаимодействия рабочей плиты с грунтом;
- наличие в реальных средах областей и зон с нелинейными свойствами, которые могут стать источником взаимодействия волн;
- конструктивные особенности вибраторов.

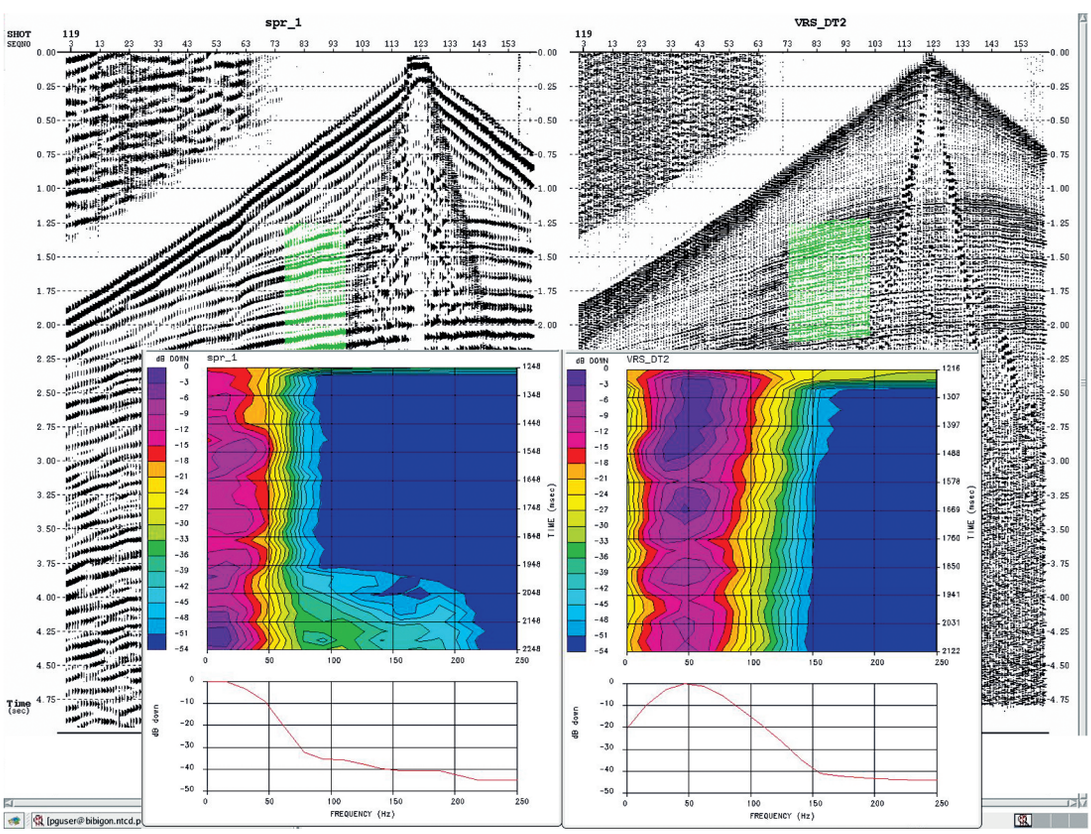

Рис. 1. **Сейсмограммы и их спектры**.
Слева – поверхностный источник, справа – источник небольшой мощности под зоной малых скоростей

Одной из основных проблем вибрационной сейсморазведки является наличие корреляционных помех. Для их минимизации используется применение специальных управляющих сигналов, характеризующихся низким уровнем корреляционных шумов.

Суть подхода – попытка решения частной задачи, вытекающей из нелинейных свойств среды, которые позволяют оценить уровни гармоник сейсмических волн, распространяемых в реальной среде. Строгое теоретическое решение задачи о распространении сейсмических волн в неупругих средах сопряжено со значительными математическими выкладками и выходит за рамки настоящей работы. В связи с этим приведено решение некоторых частных задач, вытекающих из нелинейных свойств среды, которые позволяют оценить уровни гармоник, получить уравнение Гука для среды с нелинейными свойствами и рассмотреть особенности возбуждения волн вибраторами [1].

Идея метода, озвученная авторами, заключается в следующем.

Нелинейные явления в сейсморазведке давно привлекают к себе внимание многих исследователей. К настоящему времени выполнено определенное число теоретических и экспериментальных работ, подтверждающих наличие нелинейных составляющих в сейсмических волновых полях. В смежных дисциплинах, в которых широко развиты волновые процессы (акустика, радиофизика, оптика и др.), сформировалось даже новое направление – общая теория нелинейных волн. Нелинейную сейсмику можно отнести к одному из разделов этой теории. Тем не менее широкого практического применения в сейсморазведке она не получила из-за того, что в большинстве случаев линейная теория позволяет получать достаточно полные и обоснованные решения структурных и неструктурных задач.

Результаты последних работ в области сейсмических исследований, физики взрыва, вибрационной сейсморазведки, мониторинга месторождений не могут быть полностью объяснены с позиций линейной теории волновых полей, что делает необходимым систематическое изучение нелинейных сейсмических эффектов при возбуждении и распространении волн малых деформаций.

Основываясь на этом, можно утверждать, что нелинейные эффекты в сейсморазведке будут научной и экспериментальной базой для дальнейшего развития и совершенствования метода.

Абсолютно линейных систем в природе не существует, и поэтому всякая реальная механическая система нелинейна. В силу различных причин системы представляются «линейными», их нелинейными свойствами пренебрегают. Так было в сейсморазведке и в других смежных дисциплинах (акустика, оптика и др.).

Исходные, начальные причины нелинейности обусловлены физическими свойствами реальных сред, нелинейностью уравнений теории упругости и приближенностью закона Гука, а также особенностями конструкции вибрационных источников сейсмических колебаний и способов передачи нагрузок среде.

Обычно теория колебаний и распространения сейсмических волн строится на основе разложения выражения упругой энергии в ряд по степеням тензора деформаций. При этом члены разложения третьего и более высоких порядков в предположении их малости отбрасываются, что и предопределяет линейный характер получаемых уравнений. При введении в рассмотрение членов разложения более высоких порядков линейность соотношений нарушается и возникают новые эффекты, следующие из нелинейности уравнений движения.

Нелинейность, вызванная этой причиной, называется геометрической, и она не зависит от физической природы деформируемых тел.

Второй тип нелинейности – физический, обусловлен нелинейной зависимостью напряжений и деформаций, которая носит индивидуальный характер и непосредственно связана с такими характеристиками горных пород, как их неоднородность, трещиноватость, пористость, водогазонасыщенность и др.

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет показывают, что двух- и трехфазные среды-коллекторы, характерные для нефтяных и газовых месторождений, обладают четко выраженными нелинейными свойствами. При этом особенно велика роль пузырьков газа, которые легко меняют свой объем при прохождении сейсмических волн. Отсюда следует, что уровень нелинейности нефтегазонасыщенных пород месторождений углеводородов должен быть выше, чем у вмещающих отложений. Это обосновывает создание новых, нетрадиционных способов поисков залежей нефти и газа на основе данных сейсморазведки. Данный подход неприменим к условиям угольного метана ввиду отсутствия его в свободном состоянии во вмещающей породе.

В вибрационной сейсморазведке появляется еще одна причина возникновения нелинейных явлений.

Конструктивные особенности современных вибрационных источников сейсмических колебаний таковы, что, несмотря на сравнительно небольшие развиваемые ими удельные нагрузки, разнонаправленные перемещения излучающей плиты и инертной массы вибратора несимметричны, что приводит к искажению возбуждаемых колебаний и нелинейным искажениям. В результате возникают гармонические составляющие волн, которые отсутствовали в сигналах возбуждения, что приводит к расширению спектрального состава регистрируемых колебаний и возможности освещения разреза отложений в разных полосах частот. Эта нелинейность названа механической, и она играет значительную роль в формировании волновых полей.

Таким образом, геометрическая, физическая и механическая нелинейности образуют физическую основу нелинейной вибрационной сейсморазведки.

Результаты теоретических и экспериментальных работ в этой области изложены в работах [4-8]. Особенности работы вибрационных источников, приводящие к возникновению гармоник, и возможность их использования для решения геологических задач при разведке и разработке метаноугольных месторождений рассмотрены в работах [1, 8]. В 2011 году реализация метода состоялась на Нарыкско-Осташкинском метаноугольном месторождении, позже на Тутуясской площади Кузбасса, при проведении сейсмических работ МОГТ 2-D.

Основы теории нелинейной вибрационной сейсморазведки и направления ее использования, направленные на повышение эффективности вибрационной сейсморазведки при использовании высших гармоник волновых полей

Геометрическая нелинейность обусловлена распространением сейсмических волн конечной амплитуды в реальных средах, что приводит к нелинейной зависимости между вектором перемещения точек среды и тензором деформаций. Применительно к сейсморазведке решение этой задачи приведено в работе [4].

В сейсморазведке размеры источников колебаний, как правило, намного меньше, чем длины возбуждаемых волн. Поэтому обоснованно рассмотрение задачи об излучении точечного монополя, т.е. источника без момента, в сферически-симметричной, идеально упругой нелинейной однородной среде.

В работе [1] приведены соотношения различных компонент волн, генерируемых «нелинейным» и «линейным» монополями одинакового размера.

$$\frac{A_2^{(a)}(2\omega)}{B(\omega)} \cong \frac{n}{8} k_1^2 R_a a_1 = 0{,}1, \qquad (1)$$

$$\frac{A_2^{(b)}(\omega)}{B(\omega)} \cong \frac{na}{8k^3 R_b^4} \approx 1, \qquad (2)$$

где:

Ra, Rb – радиусы монополя;

a – амплитуды колебаний стенки излучателя;

n – параметр нелинейности;

B(ω) – амплитуда излучения линейного излучателя на частоте ω;

A(ω) – амплитуда излучения нелинейного излучателя на частоте ω;

K – волновое число (k=ω/c).

Приведенные соотношения показывают, что линейные и нелинейные компоненты волновых полей соизмеримы. При этом уровень вторых гармоник у точечного монополя выше, чем у протяженного. Результаты экспериментальных работ подтверждают эти положения, особенно по интенсивности вторых гармоник (*рис. 2*). Следовательно, в спектре излучения сейсмического источника могут возникать высокочастотные составляющие, обусловленные нелинейными свойствами среды.

Применительно к нашим условиям и поставленной задаче повышения разрешающей способности сейсмической записи метод базируется именно на этом эффекте.

Угольные пласты, картирование которых является целью наших исследований, находятся, ориентировочно, на глубине до одного километра и имеют мощности от 3 до 10 метров. Угольная толща осложнена также малоамплитудными тектоническими нарушениями различного генезиса, зонами трещиноватости и разуплотнения. Учитывая высокое затухание высокочастотной части спектра исходного сейсмического сигнала с глубиной, а также непосредственную связь динамической разрешенности сейсмического разреза и амплитудного спектра сейсмической записи, предлагается расширение последнего, используя вторые гармо-

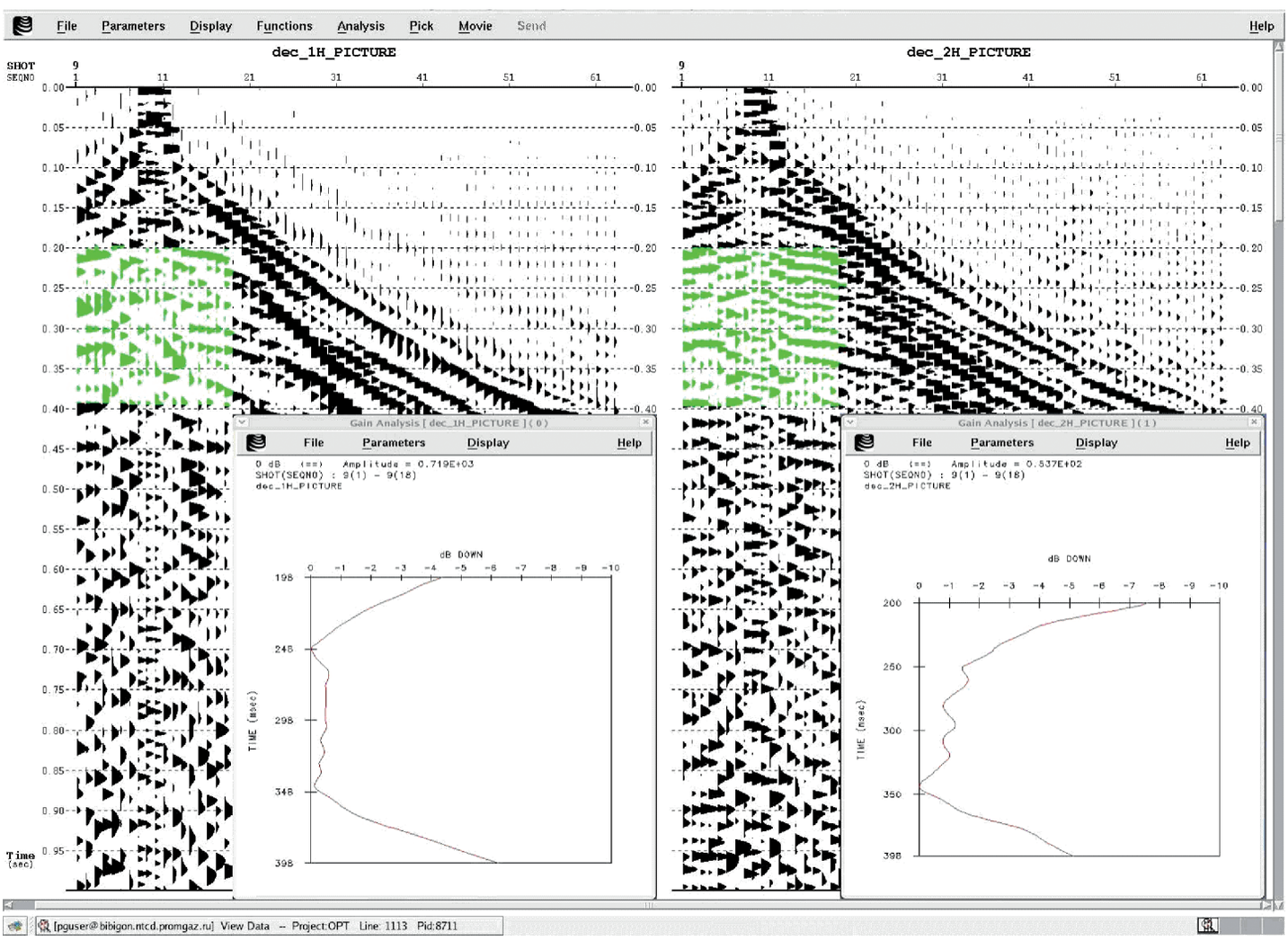

Рис. 2. Оценка амплитуд сейсмограмм 1-й (слева) и 2-й гармоник. Среднее отношение амплитуд 10:1 в заданном окне

ники, присутствующие в отраженном сигнале, возникшие в результате нелинейных искажений, свойственные сейсмическому вибрационному источнику упругих волн. Данный подход реализован на Нарыкско-Осташкинском и Олжерасском месторождениях угольного метана.

Воплощение метода

Согласно проектам сейсморазведочных работ на Нарыкско-Осташкинском метаноугольном месторождении и Тутуясской площади при отстреле сейсмических профилей использовался вибрационный источник упругих волн со следующими параметрами.

Линейный свип (sweep) шириной 10–85 Гц, разверсткой 12 секунд, продолжительностью наблюдения 17 секунд. Наблюденный материал был записан в виде коррелограмм (традиционный вид) и виброграмм в формате SEGD, двумя потоками на соответствующем носителе цифровой информации. Чтобы выделить вторые гармоники из отраженного сигнала, приходилось коррелировать (сворачивать) каждую трассу виброграммы со свипом второй гармоники (20–170 Гц шириной, разверсткой 12 секунд), (свипы представлены на *рисунке 3*). Отмечается, что уровень корреляционного шума на сейсмограммах, полученных путем свертки теоретического свипа первой гармоники и уни-

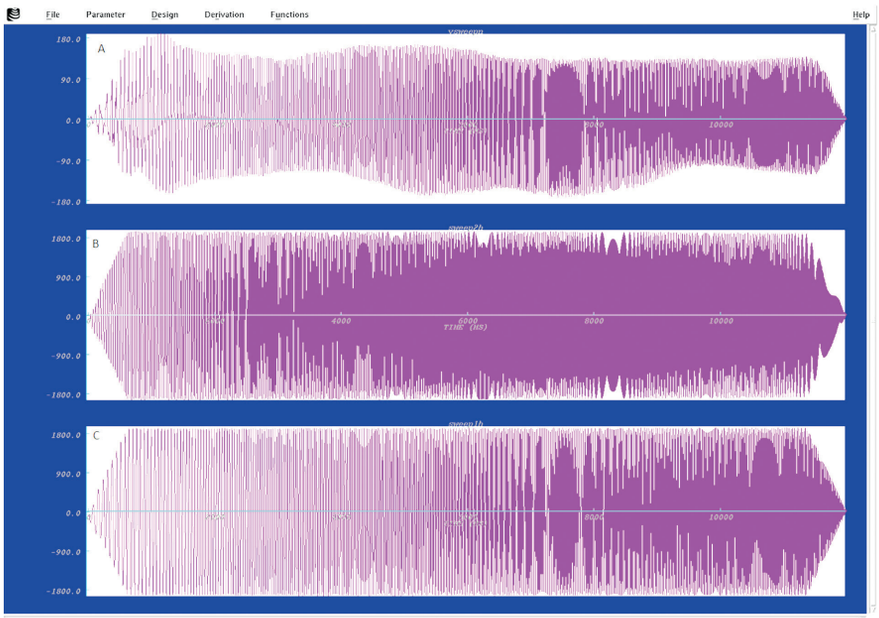

Рис. 3. Свипы: А – свип 1-й гармоники, снятый с плиты вибратора;
В – свип теоретический 2-й гармоники; С – свип теоретический 1-й гармоники

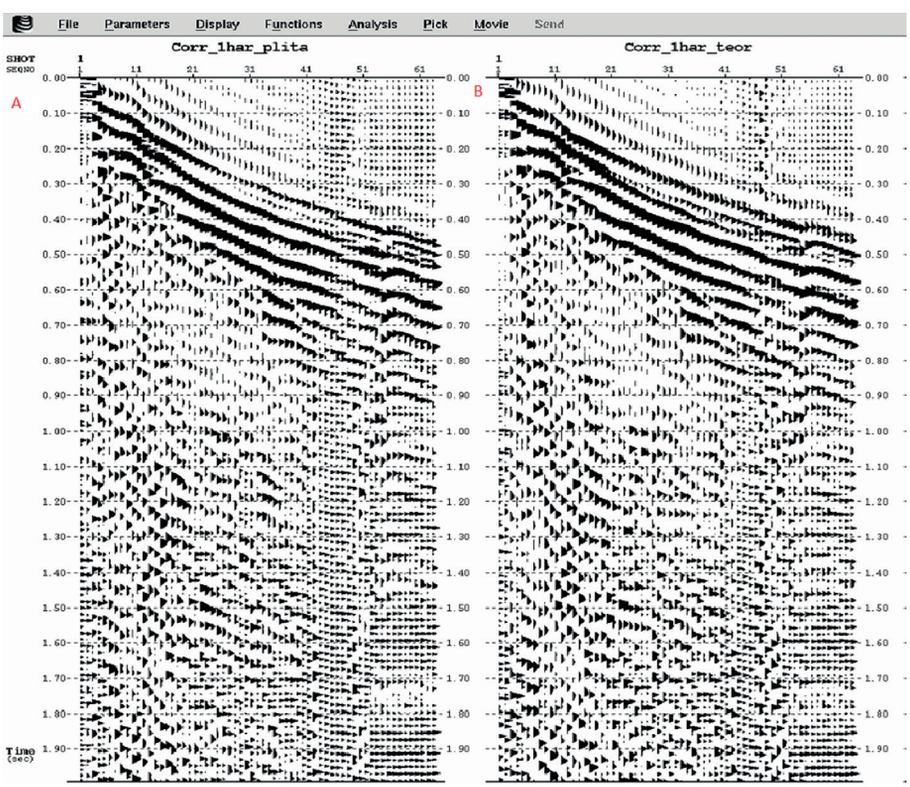

Рис. 4. Сейсмограммы, как результат свертки виброграммы
А – с уникальным свипом, снятым с плиты вибратора, В – с теоретическим свипом 1-й гармоники.

кального, снятого с плиты вибратора, практически идентичны (*рис. 4*). Корреляционный шум более выражен на сейсмограмме, полученной при свертке уникального свипа первой гармоники, снятого на одной физической точке (№ 1), но примененного к виброграмме другой физической точки (№ 29) (*рис. 5*). В связи с этим использование теоретических свипов, к наблюденным виброграммам, правомерно к изучаемым площадям.

В результате выполненных мероприятий на выходе появляются наборы сейсмограмм первых и вторых гармоник в их привычном виде (*рис. 6*). Для вторых гармоник характерен достаточно сдвинутый в сторону высоких частот амплитудный спектр (*рис. 6*).

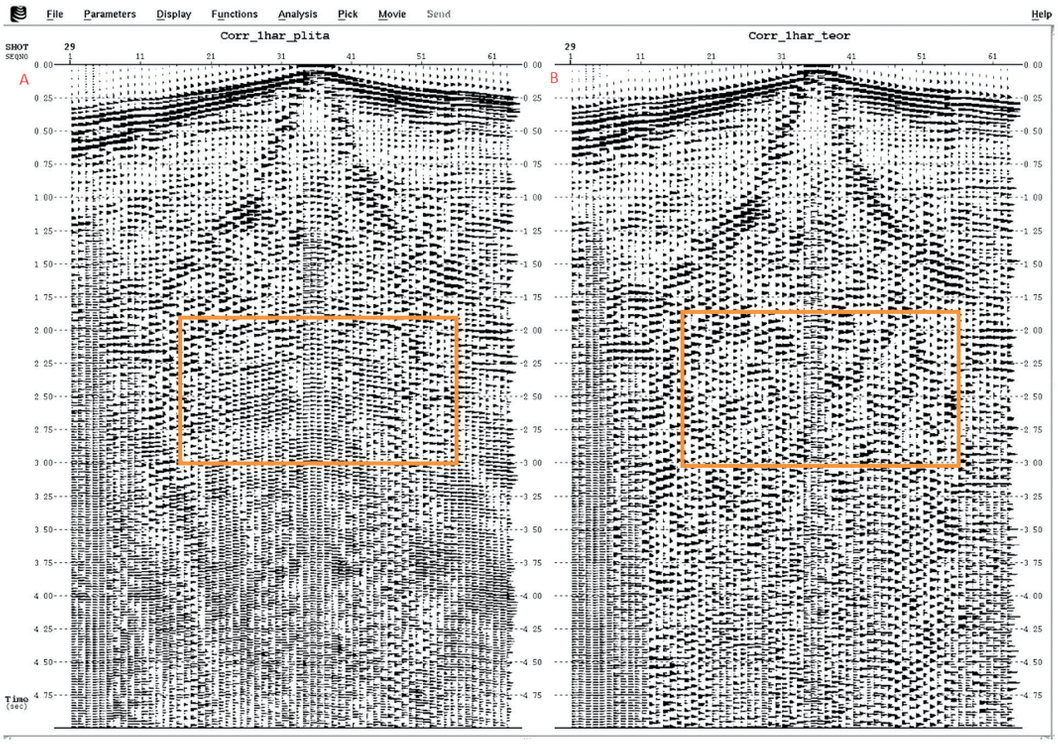

Рис. 5. Корреляционные шумы одноименной сейсмограммы №29: А – с уникальным свипом первой гармоники с «чужого» пункта взрыва №1; В – с теоретическим свипом 1-й гармоники. Уровень корреляционных шумов сейсмограммы «А» значительно выше «В»

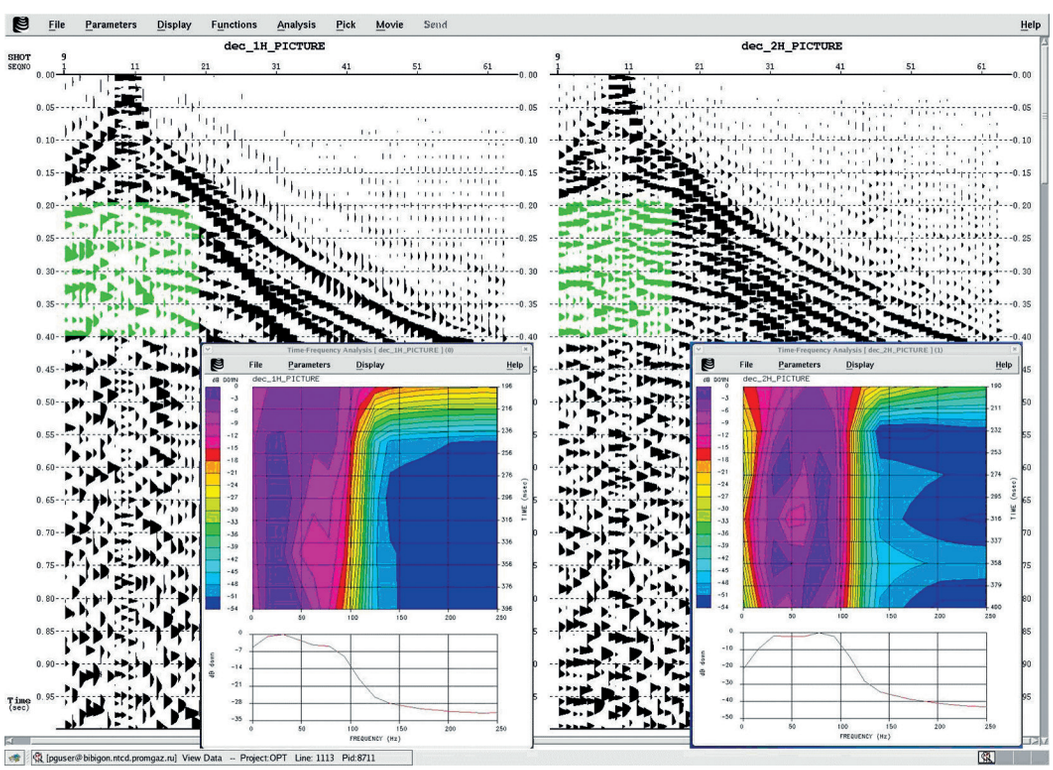

Рис. 6. Спектры сейсмограмм 1-й гармоники (слева), 2-й гармоники (справа)

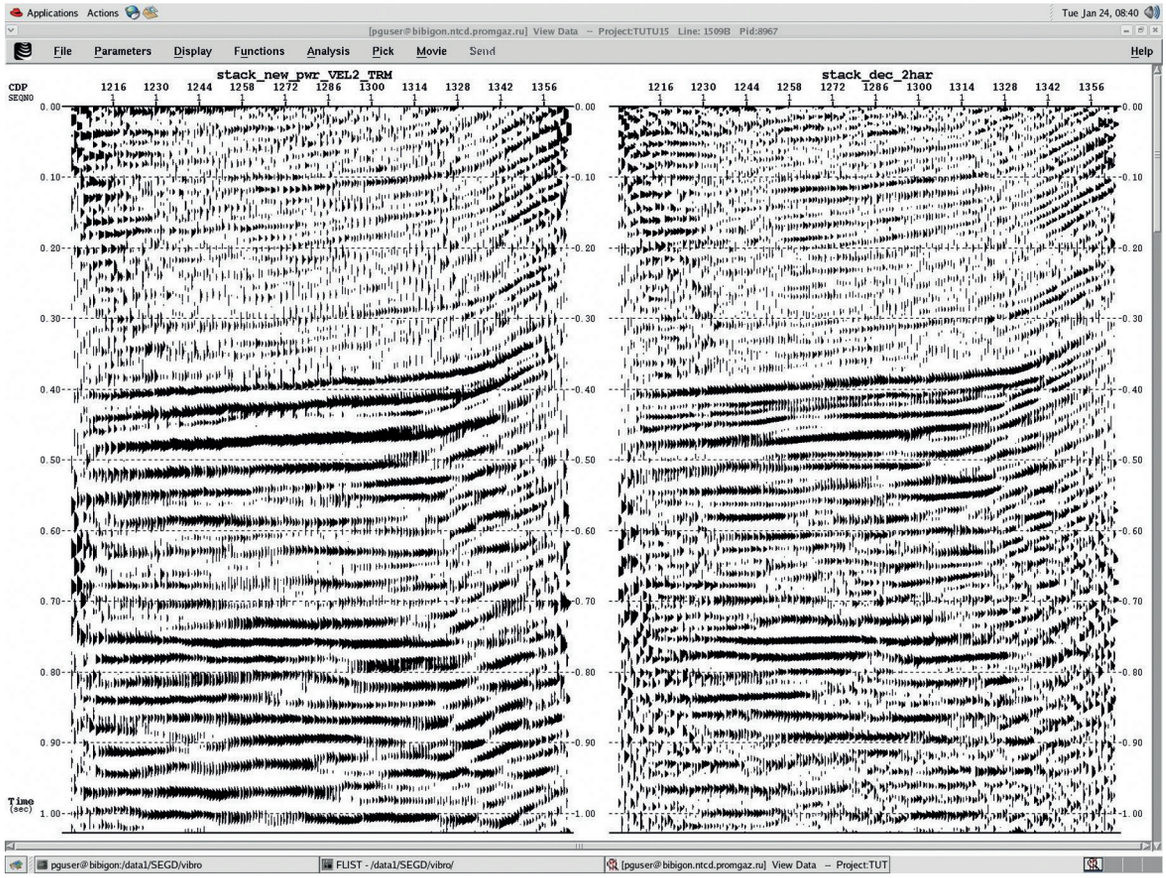

Рис.7. Фрагмент сейсмического профиля 1-й (слева) и 2-й гармоник Тутуясской площади Кузбасса

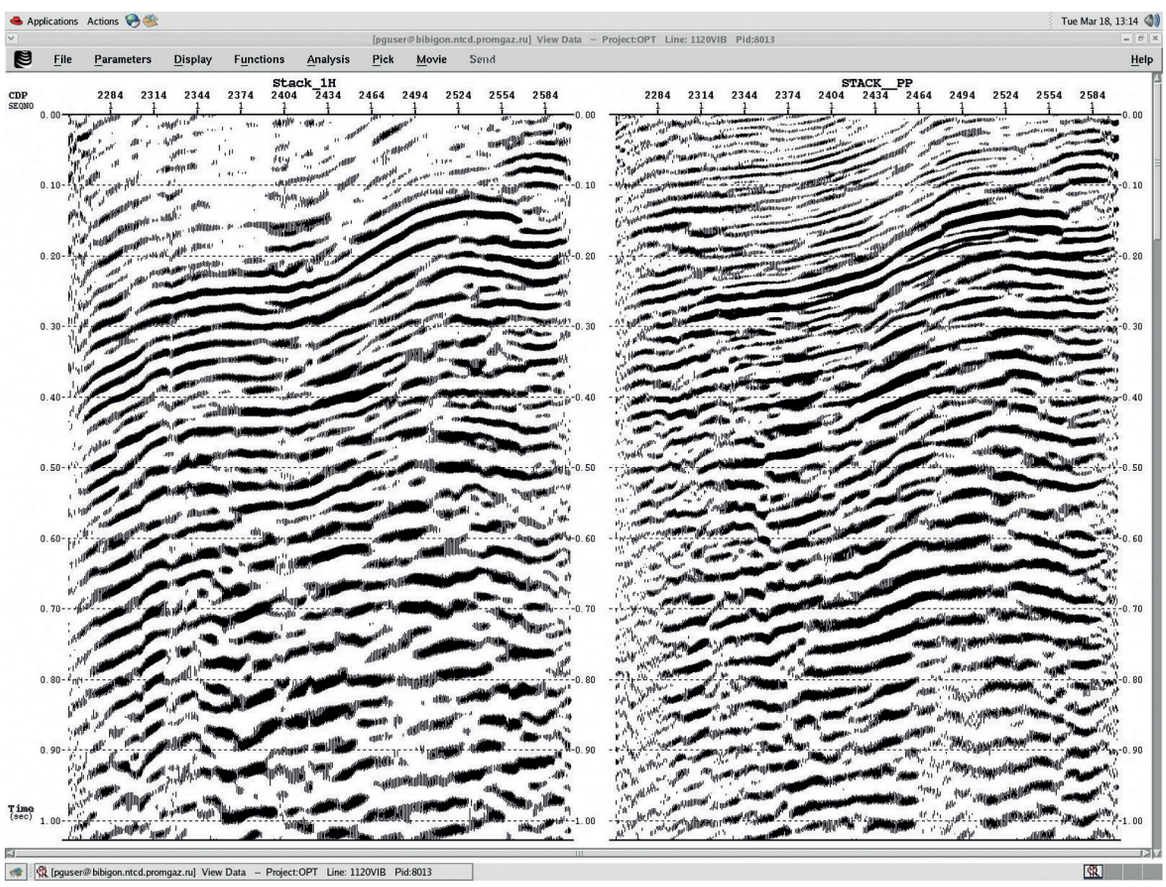

Рис. 8. Фрагмент сейсмического профиля 1-й и 2-й гармоник Нарыкской площади Кузбасса

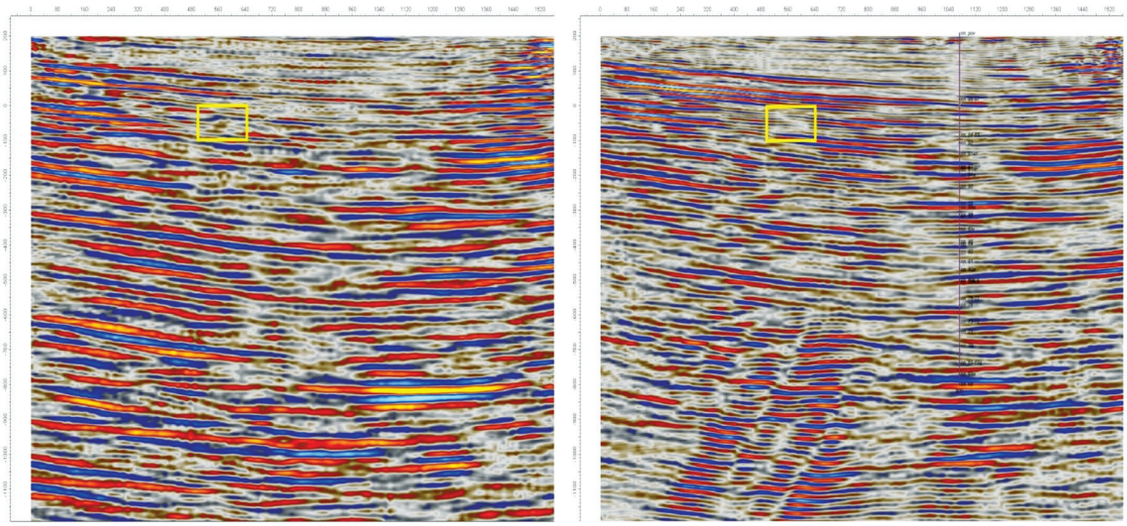

Рис. 9. Фрагмент глубинного разреза 1-й и 2-й гармоник Нарыкской площади Кузбасса. Трассирование неоднородности типа надвиг

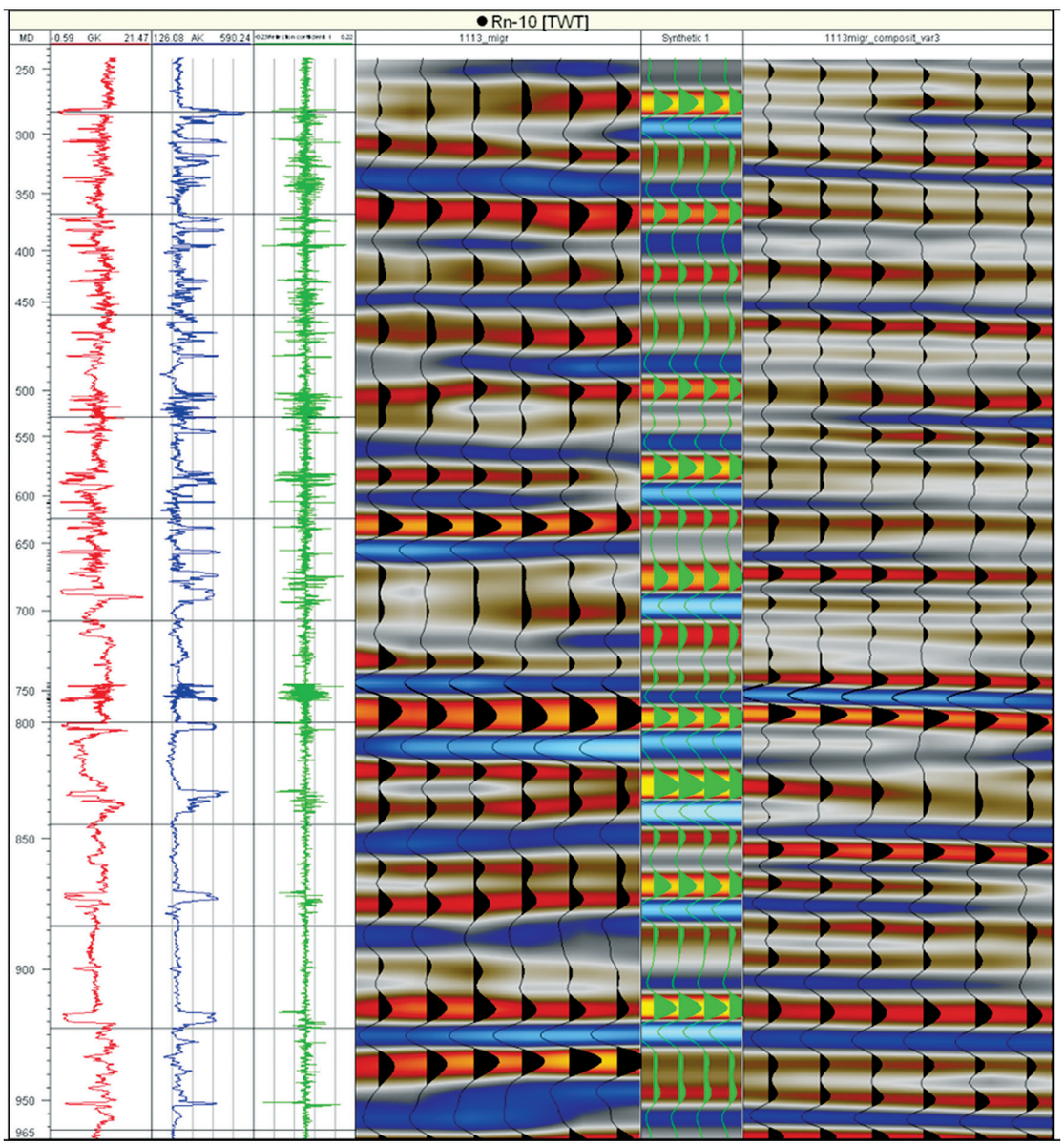

Рис. 10. Сопоставление синтетической трассы с разрезом 1-й гармоники (слева) коэффициент корреляции 60 % и 2-й гармоники (справа) коэффициент корреляции 67 %

Амплитуды 1-й и 2-й гармоник относятся примерно как 10:1 (*рис. 2*), что подтверждает теоретические положения из вышеупомянутой монографии [1].

В дальнейшем сейсмограммы первой и второй гармоник обрабатывались по выбранному графу, и в результате были получены мигрированные временные и глубинные разрезы (*рис. 7–9*). Разрезы второй гармоники более динамически разрешенные, чем стандартные. Основные горизонты угольной толщи более уверенно прослеживаются. Выделяются пачки, выходящие на поверхность и примыкающие к ней. На разрезе вторых гармоник (*рис. 9*) хорошо трассируется малоамплитудное нарушение. На стандартном разрезе имеется некая неоднородность, которую нельзя идентифицировать. Привязка скважинных геофизических данных (акустический импеданс для скважины № 10), с получением синтетической трассы и зарегистрированного сейсмического материала 1-й и 2-й гармоник профиля в окне около 600 метров, представлена на *рисунке 10*.

Коэффициент корреляции для 1-й гармоники составил 60 %, 2-й гармоники – 67 %, что говорит о более высокой достоверности сейсмического материала 2-й гармоники для соответствующих глубин.

Для всех обработанных профилей второй гармоники свойственно то, что информативная часть сейсмического поля составляет около 600–800 миллисекунд для временного разреза (800–900 метров для глубинного). Это связано, как уже отмечалось выше, с относительно небольшой амплитудой сейсмического сигнала 2-й гармоники и «затуханием» его высокочастотной составляющей с глубиной. Так как основной целью исследований являются угольные пласты, залегающие на глубинах до 1000 метров, то это ограничение не является критическим.

Выводы

Используя вышеизложенный метод насыщения временного разреза вторыми гармониками, которые возникают при использовании вибрационного источника упругих волн, в условиях геологического разреза метаноугольных площадей Кузбасса, можно значительно улучшить разрешенность верхней части разреза (до 800–1000 метров), на которой и залегают основные целевые угольные пласты. Появляются также дополнительные возможности картирования малоамплитудных нарушений и разуплотненных зон. Полученная информация используется при корректировке геологической модели месторождения, обосновании размещения эксплуатационных скважин кустового расположения, обеспечивающих формирования единой депрессионной воронки – основного условия получения максимальных дебитов метаноугольных скважин. В настоящее время на метаноугольных месторождениях Кузбасса внедряется технология многозабойного заканчивания, при которой важно иметь для заложения системы скважин (горизонтальная многозабойная – вертикальная добывающая) объективную характеристику состояния массива в месте вскрытия пласта и сопряжения скважин. На этапе опытно-промышленных работ для оценки состояния массива в створе основного ствола горизонтальной скважины целесообразно использовать рассмотренные технологии сейсмопрофилирования.

Литература

1. *Жуков А.П., Шнеерсон М.Б.* Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. – М.: Недра, 2000. – 99 с.
2. *Хаттон Л.* Обработка сейсмических данных. – М.: Мир, 1989. – 216 с.
3. Патент № 2107310. Способ высокоразрешающей сейсмической разведки методом общей глубинной точки (МОГТ) с использованием взрыва зарядов. – ОАО «Запприкаспийгеофизика».
4. Г*ущин В.В., Шалашов Г.М.* О возможности использования нелинейных сейсмических эффектов в задачах вибрационного просвечивания Земли. Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. – М.: Наука, 1981. – 144–155 с.
5. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966
6. *Зарембо Л.К., Тимошенко В.И.* Нелинейная акустика. – М.: МГУ, 1984.
7. *Николаев А.В.* Проблемы нелинейной сейсмики // Проблемы нелинейной сейсмики. – М.: Наука, 1987. – 5–20 с.
8. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / Под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра, 1998. – 527 с.

UDC 542.943

POSSIBILITIES OF PROCESSING AND INTERPRETATION OF SEISMIC DATA BASED ON THE STUDY OF SECOND HARMONICS IN MINING-GEOLOGICAL CONDITIONS OF METHOANOGENIC DEPOSITS OF KUZBASS

E.G. Abarbanel, D.A. Sizikov

(Moscow Branch of «Gazprom project»)[1]

Traditionally, 2D seismic surveys are used to study the structure of the geological section in preparation for the development of hydrocarbon deposits. A monotonous terrigenous section containing coal seams with a thickness of a few meters typical of Kuzbass methane deposits and a small depth of the target horizons (up to 1000 m) require certain seismic exploration technologies and methods for processing the obtained materials. As part of this work, technologies will be proposed for studying the upper part of the section using pulsed, vibrational sources of elastic vibrations, and processing methods using higher harmonics of the frequency spectrum of nonlinear wave fields aimed at increasing the resolution of the time section for selecting and substantiating objects for exploration of coalbed methane.

Keywords: coalbed methane fields, high resolution seismic, nonlinear vibrational seismic, second harmonics

About the authors

E.G. Abarbanel,
Head of the Department of Geophysics and Geological Field Research

D.A. Sizikov,
Head of the Department of Geology

References

1. *Zhukov A.P., Schneerson M.B.* Adaptive and nonlinear methods of vibrational seismic exploration // M.: Nedra, 2000. – p. 99.
2. *Hatton L.*, Processing of seismic data // M.: Mir, 1989. – p. 216.
3. Patent No. 2107310, High-resolution seismic exploration method using the common deep point method (CDPM) using a charge explosion // OAO «Zaprikaspiygeofizika».
4. *Gushchin V.V., Shalashov G.M.*, On the possibility of using nonlinear seismic effects in problems of vibrational transillumination of the Earth. Exploration of the Earth by non-explosive seismic sources // M .: Nauka, 1981. – pp. 144–155.
5. *Zarembo L.K., Krasilnikov V.A.*, Introduction to nonlinear acoustics // M .: Nauka, 1966.
6. *Zarembo L.K., Timoshenko V.I.*, Nonlinear acoustics // Moscow, Moscow State University, 1984.
7. *Nikolaev A.V.* Nonlinear seismic problems. Problems of nonlinear seismic // Moscow:, Nauka, 1987. – pp. 5–20.
8. Ed. M.B. Schneerson.,Theory and practice of land-based non-explosive seismic exploration // M.: Nedra, 1998. – p. 527.

[1] Moscow Branch of «Gazprom project»
23, Vokzalnaya street, city Vidnoe, Moscow region, 142700, Russian Federation