

Сейсмическая интерпретация с использованием частотных характеристик сейсмической трассы — предварительное исследование

Seismic interpretation using seismic trace frequency attribute properties – a preliminary study

Chen Gengyi,^{1*} Xia Zhu,¹ Wei Wenbo,¹ Yu Qinfan,¹ и Liu Chaoying²

Частотно-временной анализ (Т-Ф) характера сейсмического отражения от тонких пластов (Widess, 1973; Mahradi, 1983; Yang, 1988; Yin и др., 2003) все более и более применяется в обработке высокоразрешающих сейсмических данных и интерпретации, особенно для последовательной интерпретации сложных континентальных фаций. Оно включает идентификацию и разделение многоуровневых комплексов, определение микрофаций осадочных слоев и циклической структуры тонких песчано-глинистых прослоек, и прогноз толщины тонких пластов (Li, 1987; Jin, 1988; Mushen и др., 2000; Ling Yun, 2004), и т. д. При использовании различных математических преобразований, например преобразования Фурье, вейвлет-преобразования, преобразования Вигнера-Вила, преобразования Габора и т. д., (Cohen, 1989; Williams и др., 1989; Boashash, 1991; Bahorich, 2002), частотно-временной анализ позволяет нам анализировать и изобразить подробно локальные спектры входных сигналов для получения полных знаний их микроструктур при высоком разрешении в частотной области.

В данной статье используется прямое и обратное преобразование Фурье (полный частотный диапазон, локальное разложение частот и суперпозиция) для проведения частотно-временного анализа (Mushen, 1992; Du, 1998; Wang, 2000), используется двухоктавный треугольный широкополосный рекурсивный (экспоненциальное увеличение) фильтр (рис. 1) для того, чтобы убрать резонансные эффекты толщины маломощного пласта и литологии (Widess, 1973; Mushen, 1992; Du, 1998; Wang, 2000). Основная характеристика фильтрации — то, что она может выделить преобладающие частоты в различных частотных диапазонах без упущения постепенного изменения частотных характеристик (рис. 2). При изучении частотных характеристик сейсмических данных, полученных в результате 3D съемки, с использованием фильтрации, доступной в нашем программном пакете частотно-временного анализа, мы обнаружили, что существует четкая зависимость между многоуровневым разветвляющимся строением частотно-временной диаграммы, свойствами пластов и осадочными циклами. Эта идея делает возможным изучение стратиграфического комплекса и резервуара прямо по частотным характеристикам сейсмических данных, а также предоставляет новый способ анализа для высокоточной геологической интерпретации сейсмических данных.

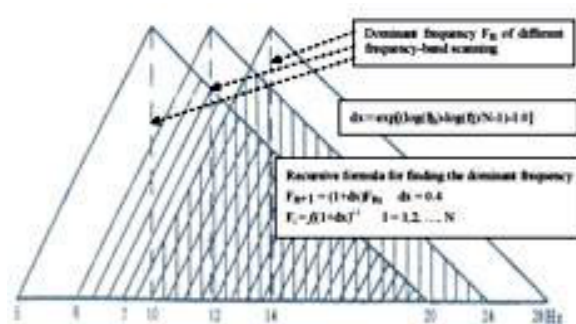


Рис. 1 Длина шага фильтрации и демонстрация рекурсивного алгоритма «двухоктавного нуль-фазового треугольного широкополосного фильтра». (f_h — верхняя граница пропускаемых частот при частотно-временном анализе; f_l — нижняя граница пропускаемых частот при частотно-временном анализе; N — число фильтров; dx — перебираемые шаги.)

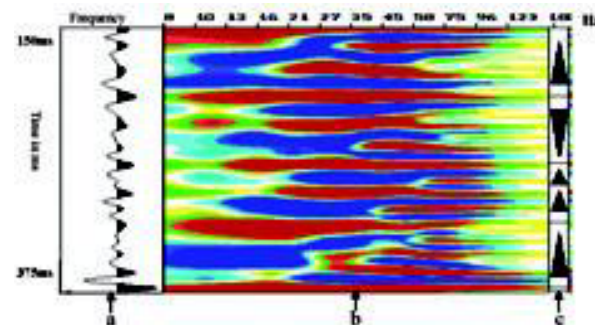


Рис. 2 Частотно-временной анализ сейсмической трассы, с использованием «двухоктавного нуль-фазового треугольного широкополосного фильтра» (a — синтетическая сейсмическая трасса, с преобладающей частотой импульса Рикера, равной 50 Гц. b — колонка частотно-временного анализа с помощью «двухоктавного нуль-фазового треугольного широкополосного фильтра». c — сейсмические циклы, выделенные из b, где угол при вершине черного треугольника представляет высокие частоты, которые соответствуют более тонким слоям, а противоположная сторона угла представляет низкие частоты, которые соответствуют более толстым слоям.)

¹School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, No. 29, Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100083, China.
Email: gyichen@163.com.

²Geophysical Research Institute of BGP, Jiaxiu Road, Zhuozhou, Hebei 072750, China.

Анализ по частотным характеристикам

Чтобы минимизировать воздействия на амплитудные и частотные характеристики, кроме тех, которые возникают за счет изменений свойств пластов (например, толщины, литологии), сейсмические данные, которые мы использовали в нашем исследовании (получены в результате съемки в районе бассейна Songliao в Китае) были просуммированы после обработки высокоразрешающих данных с целью расширения диапазона частот, ослабления различных типов помех (включая кратные волны), и, в общем, получения изображения с высокой точностью воспроизведения и с высокой разрешающей способностью. Эффективный диапазон частот данных: 8-110 Гц. Новый трехмерный массив данных вертикальных колонок частотно-временного анализа одиночных сейсмотрасс (рис. 3) был получен в результате фильтрации сейсмических данных с высокой разрешающей способностью.

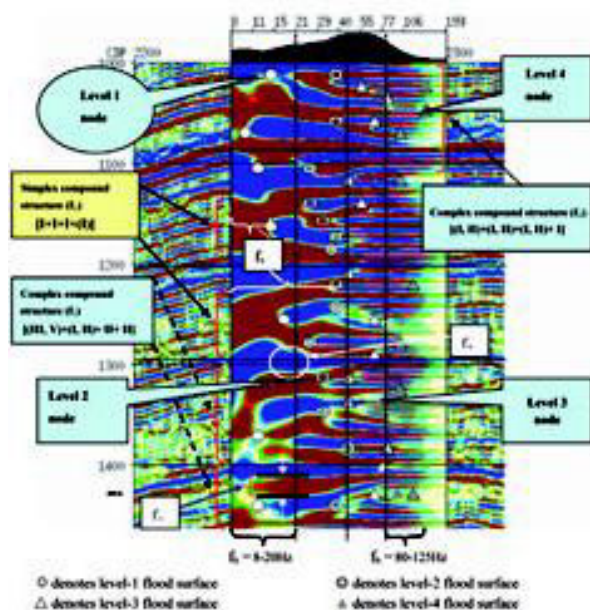


Рис. 3 Эскиз колонки частотно-временного анализа, классификация точек и сложная структура разветвления на 3D профиле. f_b — согласно вертикальному распределению точек различного уровня, эффективный диапазон частот разделен на несколько устойчивых поддиапазонов, которые грубо соответствуют различным комплексам. f_s — стиль структурного типа частотно-временного спектра, его можно использовать для определения типа комплекса и контроля кровель и подошв комплексов. Частотная ветвь: полосчатая - и древовидная формы строения частотно-временного спектра, полученного суммированием всех преобладающих частот во временной области частотного диапазона сейсмической трассы после применения треугольного фильтра. f_v : диапазон частот, в определенной частотной полосе, от основания частотной ветви (низкая частота) до разветвляющейся вершины определенного уровня. f_c : частотная массовая энергия в частотном диапазоне, области, подобной окружающей в частотной ветви, где максимально регулируемые амплитуды накапливаются, и может быть несколько таких областей различных размеров в частотной ветви. f_t — временная мощность частотной ветви, временная мощность различна для верхней и нижней границ каждой частотной ветви в направлении частоты; f_t имеет значения только, когда ведется измерение или сравнение временных мощностей частотных ветвей в том же частотном диапазоне.

Сейсмические частоты во временной области были найдены после всестороннего изучения множества частотно-временных колонок (диаграммы амплитудно-частотного спектра) ряда профилей сейсмического межскважинного просвечивания для того, чтобы свести нижеследующие параметры воедино.

Частоты сейсмической трассы обычно характеризуются поперечной многоуровневой разветвляющейся структурой, которая, согласно их различным проявлениям, может быть разделена на восемь основных типов, то есть трисекция-поперек-трисекция, лепесток, бисекция-поперек-бисекция, веер-полу-веер, дуга-полу-дуга, без разветвления, линейный, и нерегулярный, первые шесть типов являются общими (таблица 1). Различные типы структур представляют сейсмический отклик на комплексы различных типов, масштаб относительных колебаний уровня моря и диагенетические изменения окружающей среды. Частоты сейсмических трасс во временной области часто являются комбинацией одного или более вышеупомянутых основных типов, формируются два комплексных типа: симплексное соединение и комплексное соединение (рис. 4, рис. 5, и рис. 6), и формируются многоуровневые разветвления 2-4 уровней.

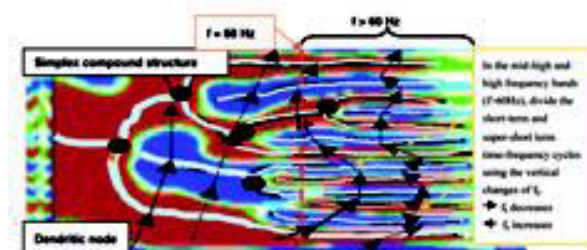


Рис. 4 Уровень 4 сложной структуры: I-I-I-I (обозначает дендритный узел).

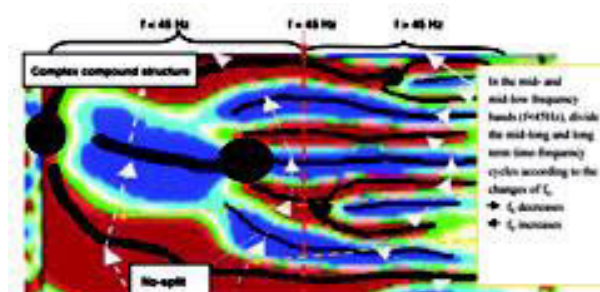


Рис. 5 Уровень 3 узловой структуры: I-III-I.

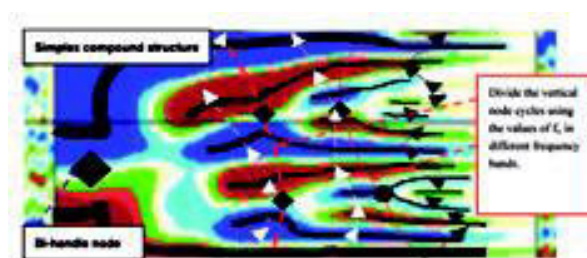


Рис. 6 Уровень 3 узловой структуры: II-II-I(II) (узел с двумя ветвями).

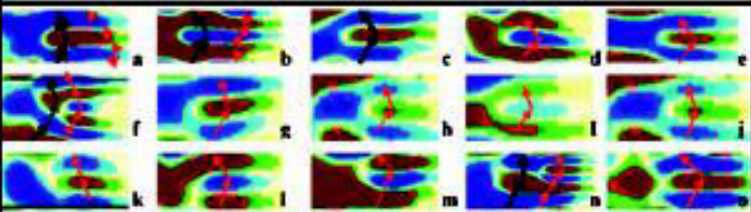
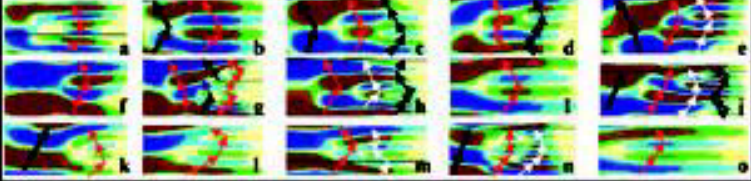
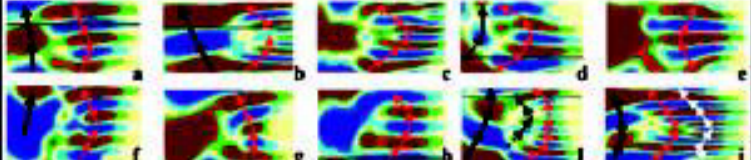
Type	The illustration of the vertical patterns of seismic frequency	Description
I Tribranch and lateral-tribranch		Generally the tribranch shows in tribranch shape consisting of a trunk and three branches with obvious nodes. The branches developing from the low-frequency trunk shows parallel, and the top and bottom ones represent various developed sequence interfaces, however the middle one doesn't connect to the hanging node. In terms of connection between trunk and branches and the tribranch orientation, the tribranch structures can be classified into: positive tribranch, semi-positive tribranch and lateral tribranch. For the positive tribranch, the top and bottom branches are from the trunk, and clear and strong. The semi-positive tribranch has only one clear branch connecting to the trunk. While for the lateral, one top or bottom branch connects to the trunk. Accidentally there are similar tribranch structures, but without any connection between branches as trunk (see the lower right corner). Please look at the figures shown in the table for details.
II Petal-shaped		Moving from low to high frequency, the top hand bottom lateral trunk (sequence interface) bend inward to make a petal featured as short or long-handled appearance. Sometimes no obvious node can be seen, inside the main petals, there are two, three or four sub-petals, which are parallel or slightly curved and with no connection to its root. Different petal can be seen for different frequency changing direction and time thickness, and other factors.
III Fan and semi-fan		Generally 3-branches constitute fan structures. According their integrity, symmetry and structure, there are fan-like structures (3-6 leaves) and semi-fan-like structures (2-4 leaves). The main points of fan is the longer handle and circular fan leaves (or semicircular), and the handle and fan leaves tightly connect or not, with clear nodes. The figures in right show the real structure.

Таблица 1 Структуры частотных характеристик во временной области и их простые иллюстрации

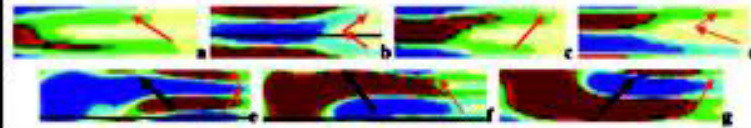
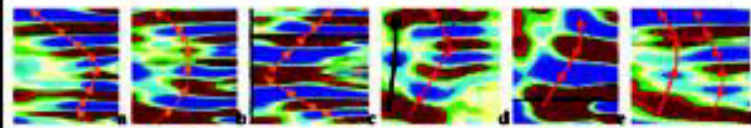

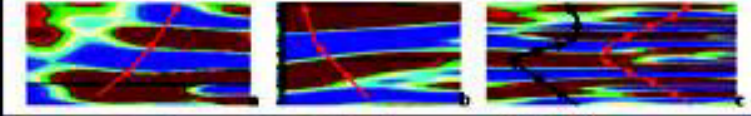
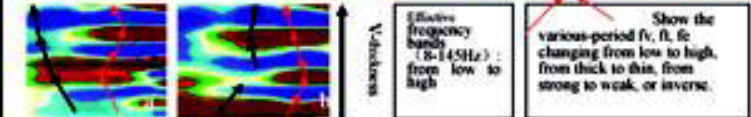
IV Bisection and lateral-bisection		Bisection shows a trunk heading down to two symmetric and parallel branches. If a branch developed from the dominant side trunk, parallel and with no connection to the dominant one, this structure with clear nodes is called lateral bisection, which sometimes also looks like similar bisection resulted from the different match of the two main branches. Bisection mostly appears in HSEZ frequency band, while lateral bisection is in broader frequency band. The branches of bisection extend relatively shorter than that of lateral bisection along increasing frequency. Two branches split in various degrees.
V Arc and semi-arc		The arc structure has no visible podocels or the podocels are very short and hard identified. The arc branches are generally 3-6, evaginating or concaving along with the frequency increase.
VI Ramification-free		The frequency twigs appear various shapes such as club, head, dentary base, pipe and S, spreading linearly or curvally, with accidental ramification in middle-high band. From low to high frequency, single time thickness changes from thick to thin. The broader spread of the frequency band generally indicates large-scale sequence interface.
VII Linear		Vertically, within certain time depth, a number of twigs array along increasing or decreasing frequency. This forms linear increase or decrease patterns, which always appear in low-mid-low frequency band.
VIII Irregular		Vertically, the twigs show irregular change in length, frequency mass energy, time depth and spreading direction.

Таблица 1 (продолжение)

Многоуровневый узел — другая частотная характеристика с разветвляющимися строениями (рис. 3). В пределах области исследования, статистические значения частот узлов от уровня 1 до уровня 4 всех почти хороших трасс принадлежат четырем соответствующим частотным диапазонам: 8-20 Гц (14.5 Гц), 20-42 Гц (30.8 Гц), 45-70 Гц (57.3 Гц), и 80-125 Гц (93.9 Гц) (где значение в скобках — соответствующее статистическое среднее значение). Узлы могут быть классифицированы в две категории: узлы с одной ветвью (имеющие форму дерева), узлы с двумя ветвями, и узлы всех уровней имеют специфические геологические значения (рис. 4 и рис. 6).

Характеристики (рис. 3) сейсмических частот, принадлежащих различным частотным диапазонам (f_b), такие как частотная ветвь, f_v , f_c , f_t , разветвляющиеся узлы и т.д., все относятся к отличительным признакам вертикальной цикличности (рис. 3, рис. 4, рис. 5, и рис. 6). Это вызвано изменением частоты за счет литологии и толщины слоев, что вызывает отклик частоты на строение и свойства слоев. Например, на сейсмических трассах, если глубина уменьшается в пределах определенного частотного диапазона, мы видим рост (слева направо) f_t смежных узлов, спад f_c и спад f_t , тогда это соответствует процессу вздымания поверхности осадконакопления. Эта модель демонстрирует, что для горных пород данного особенного комплекса зернистость становится более мелкой и мощность становится меньше с уменьшением глубины, и наоборот. Поэтому, в пределах различных

частотных диапазонов, вышеупомянутые характеристики сейсмической частоты могут использоваться для опознавания и разделения многопериодных частотно-временных комплексов различных типов.

Интерпретация частотных характеристик

Корреляция скважинной литологии и осадочных циклов показывает, что существует заметный отклик различных частотных характеристик на свойства слоев. Основываясь на теории цикла поднятий и опусканий осадочных толщ (Meckel и др., 1977; Cross и др., 1993) и частотной интерференции различных частотных диапазонов (Sheriff и др., 1999), мы можем анализировать и обсуждать последовательные значения разветвляющихся частотных структур в таблицах 1 и 2, и показать, как опознавать и разделять многопериодные частотно-временные циклы, используя изменения ритмов различных характеристик частот во временной области. На рис. 6 приведены примеры зависимости частотных характеристик от свойств слоев и влияния осадков.

Рассматривая тип частотно-временной структуры сейсмической трассы и разделение многопериодных частотно-временных комплексов, мы можем сказать что:

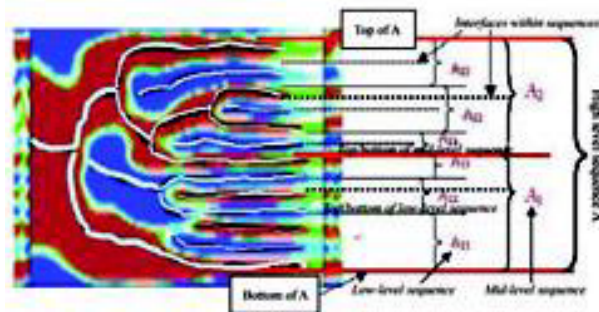
- Все сложные (симплексные или комплексные) частотно-временные структуры соответствуют вложенным, многоуровневым сложным комплексам, и уровень (определенный эффективным распределением частотного диапазона) уменьшается от внешних до внутренних частей, что может быть легко определено. Сложный комплекс с самым высоким уровнем (наиболее удаленная) определяется частотным диапазоном, который его покрывает, размером структуры VI-типа, ограниченной его кровлей и подошвой, и его временной мощностью. При широком частотном диапазоне структуры VI-типа с очень низкой начальной частотой, большие мощности между кровлей и подошвой достаточны для определения частотно-временного цикла с самым низким уровнем в пределах сложной разветвляющейся структуры (рис. 7). Разбиение внутренних циклов и поверхностей раздела (поверхности размыва) в пределах сложных комплексов, и переходы между вышележащими и нижележащими сложными комплексами составными последовательностями, определяются согласно таким параметрам комплексов высокого уровня как f_s , f_b , f_t , f_c , узлам различного уровня и т.д. (рис. 11).

- Симплексные частотно-временные структуры (например, I, II, III, IV, V, VI и т.д.), вообще соответствуют уровням комплексов согласно эффективным частотным диапазонам. Например, структура, распределенная в низком и средне-низкочастотном диапазоне ($f < 45$ Гц), часто относится к маломощному комплексу с уровнем 3 или 4, а структура в среднем и средне-высокочастотном диапазоне ($f > 45$ Гц) — к комплексам с более низким уровнем: 5 или 6, группы псевдокомплексов, псевдокомплексы, группы песка, или даже еще более тонкие слои. Кровля и подошва также определены с помощью VI, а внутренняя структура и поверхности раздела определены и разделены с помощью изменений вертикального цикла f_s , f_c , f_b , f_t и расположением узла диапазона высоких частот.

вложенных частотно-временных структур, мы можем сказать что:

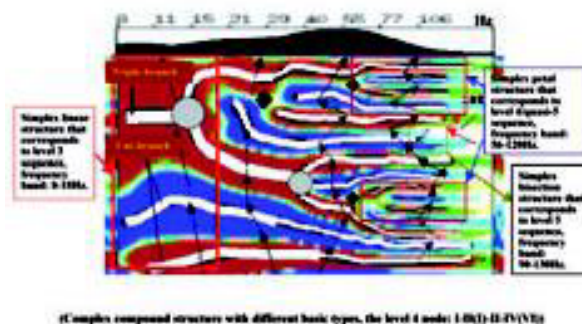
- Симплексная сложная структура (составленная из тех же самых типов базовой структуры) отражает ритм комплексов различного уровня, даже переходы между смежными комплексами, и относительно симметричных комплексов полного цикла. Только различия в амплитудах от осадков различного периода показывают, что набор слоев был вообще в установившейся среде диагенеза (гидродинамические условия) (рис. 4).
- Структура сложного строения (составленная из различных типов базовой структуры) отражает различные ритмы различных комплексов, крутой переход между смежными комплексами, недостаточную симметрию и незаконченность циклических структур, вертикальные изменения типов цикла и внутренние особенности комплексов и особенно сложные вариации фаций (осадочные и гидродинамические условия) (рис. 8).
- Различные типы узлов в сложных структурах относятся к масштабу возмущений и опусканий поверхности осадконакопления и периода времени. Например, узлы с двумя ветвями отражают процессы долгих колебаний поверхности осадконакопления с относительно долгим застойным временем и медленным осадконакоплением (рис. 6). Обратное верно для узлов с одной ветвью (древовидный тип) (рис. 4).

Рис. 7 Симплексная сложная структура, определение и разделение многопериодных частотно-временных



комплексов.

Рис. 8 Симплексная структура, определение и разделение



многопериодных частотно-временных комплексов

Относительно сложных частотно-временных структур сейсмической трассы и среды диагенеза многоуровневых

Касательно ответных соотношений между многоуровневыми узлами и потопленными поверхностями в частотно-временных комплексах и физических свойств горных пород:

○ Многоуровневые узлы в различных частотных диапазонах обычно вызывают локализацию дальнейшего деления в пределах больших, толстых слоев из-за изменения толщины или литологии. Это экстремальные точки возвышения или понижения поверхности осадконакопления разных уровней (масштабов), и важные частотно-временные реперы для определения поверхностей раздела (многопериодные потопленные поверхности) в пределах комплексов (рис. 1). Также существуют некоторые отдельные соответствия литологии и толщины с частотами различных частотных диапазонов. Вертикальное изменение частоты (осадочный цикл) узлов того же уровня, и эволюционные пути узлов, принадлежащих либо к латеральной, древообразной, разветвляющейся спектральной серии, либо к линейным спектральным сериям имеющей форму дерева, разветвляющейся спектральной серии или линейная спектральная серия, все связаны с зернистостью и толщиной фактических слоев. Здесь высокочастотные узлы в циклах того же уровня означают, что слой горной породы этого уровня расположен там, где зернистость является самой мелкой, или толщина является самой тонкой, и обратное верно для низкочастотных узлов. Колебания f_v (малые или большие) для узлов из низко и средне-низкочастотных диапазонов могут использоваться для обнаружения вертикального изменения зернистости соседних формаций (зернистых слоев). Колебания узлов в средневысоких и высокочастотных диапазонах выявляют вертикальное изменение мощности (мощность слоя) (рис. 6, таблица 2).

В особых частотных диапазонах (f_b), существует соответствие между частотными характеристиками (узлов, f_s , f_c , f_b , f_v , и т.д.) частотно-временного спектра и внутренней структурой (цикл) многоуровневых частотно-временных комплексов:

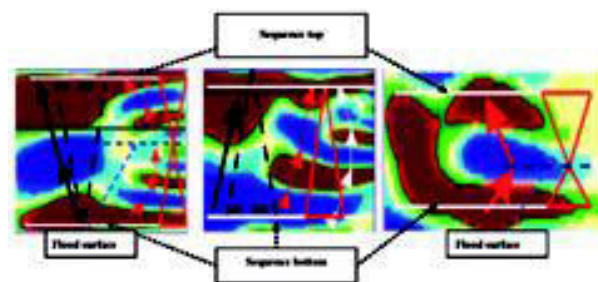


Рис. 9 Разделение среднечастотного частотно-временного цикла с использованием частотной характеристики f_c низко и средне-низкочастотных (меньше чем 45 Гц) частотных диапазонов.

В низко и средне-низкочастотных диапазонах ($f_b < 45$ Гц), литология является основным влияющим фактором, f_s (использовался для определения типа комплекса и контроля границ слоев, см. рис. 3), а f_c главным образом использовался для определения и разделения внутренних циклов (полный или полуцикл, черная стрелка, черный треугольник, красная стрелка, красный треугольник, см. рис. 9) частотно-временных комплексов высокого уровня (рис. 5). Треугольник вершиной вверх обозначает смену характера поверхности осадконакопления от опускания (мелководье) к вздыманию (глубоководье), а треугольник вершиной вниз обозначает смену характера поверхности осадконакопления от вздымания (глубоководье) к опусканию (мелководье).

В средневысоких и высокочастотных диапазонах ($f_b > 60$ Гц), толщина является основным влияющим фактором, f_s и f_t — главные характеристики для определения и разделения внутренних циклов частотно-временных комплексов низкого уровня (полный или полуцикл, черная стрелка, черный треугольник; красная стрелка, красный треугольник; белая стрелка, белый треугольник). Изменение f_t соответствует полному ритму вздыманий и опусканий поверхности осадконакопления (опусканий и вздыманий), который демонстрирует тенденцию полного или единственного изменения толщины слоя рис. 4, рис. 10).

Group No.	Thickness (m)	Thickness ratio (m/m)	Depth (m)	Two-way traveltime (ms)	Primary node	Secondary node	Third node	Fourth node	Grain grading and layering: primary node (left), secondary node (right)	Grain grading and layering: (third node)	Grain grading and layering: (fourth node)	Single layer thickness	Formation and facies features in Qing-3 interval.
Sep-1	52	0.20	1542	1215					finest	XI thin	thickest	It is thin in general, but a little thick in group Sep-2	In upper Qing-3 interval (above Group 9), most area are rich for thin siltstone and brown-red siltstone and shaly sand, accidently siltstone can be seen, and there are calcareous sandstone in shale. Generally, the grain is fine and water energy is low, with insufficient resource and in oxidation environment. The geological formation belongs to delta plain sub-facies.
Sep-2	39	0.25	1581	1243					finer	IX thinner	thicker		
Sep-3	37	0.22	1619	1256					fine	VII thicker	thicker		
Sep-4	33	0.35	1651	1275					fine	VII thicker	thinner		
Sep-5	22	0.53	1673	1290					fine	VI thinnest	thinnest		
Sep-6	17	0.61	1690	1305					coarser	V thinner	thinner		In lower Qing-3 interval, there sedimented grey shale, siltstone and siltstone which exist in thin and locally thick layers. Generally, the grain is coarser in upper section. The water grain is average fine, and the geological environment is weak oxidizing-deoxidizing. This interval belongs to delta front sub-facies.
Sep-7	18		1700	1319					coarser	IV thinner	thinner		
Sep-8	34	0.34	1742	1330					coarser	III thin	thicker		
Sep-9	21	0.68	1763	1342					coarser	II thicker	thick		
Sep-10	43	0.62	1806	1360					coarser	I thicker	thicker		
Sep-11	37	0.52	1843	1373					coarser	I thicker	thicker		
Sep-12	29	0.63	1872	1387					coarser	I thinner	thin		

Таблица 2 Зависимость литологии и толщины от колебаний частотных ветвящихся узлов и многоуровневых узлов в интервале Qing-3.

plateau area				information and		mainly reflect		mid-east period		east period		west-east		dividing T-F response by frequency (Hz) and S				dividing T-F response by S and S				Midlunge T-F response				response period (s)																																																																																																																																																																																																																	
system	area	group	interval	location	cycle number	cycle number	large	small	large	small	large	small	large	small	large	small	large	small	large	small	large	small	large	small	large	small																																																																																																																																																																																																																	
Cretaceous	Lower Cretaceous	Qinghai	Qing-3	Q1-1	F ₁	S1	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁																																																																																																																																																																																																																		
				Q1-2																						F ₂	S2	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂	F ₂																																																																																																																																																																																													
				Q1-3																																											F ₃	S3	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃	F ₃																																																																																																																																																																								
				Q1-4																																																																F ₄	S4	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄	F ₄																																																																																																																																																			
				Q1-5																																																																																					F ₅	S5	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅	F ₅																																																																																																																														
				Q1-6																																																																																																										F ₆	S6	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆	F ₆																																																																																																									
				Q1-7																																																																																																																															F ₇	S7	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇	F ₇																																																																																				
				Q1-8																																																																																																																																																				F ₈	S8	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈	F ₈																																																															
				Q1-9																																																																																																																																																																									F ₉	S9	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉	F ₉																																										
				Q1-10																																																																																																																																																																																														F ₁₀	S10	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀	F ₁₀																					
				Q1-11																																																																																																																																																																																																																			F ₁₁	S11	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁	F ₁₁
				Q1-12																																																																																																																																																																																																																																							

Таблица 3 Классификация частотно-временного комплекса (Т-F) и последовательности слоев около скважины Gan-119.

В среднечастотном диапазоне ($45 \text{ Гц} < f_b < 60 \text{ Гц}$, переходная зона), характеризующемся влиянием как мощности, так и литологии, частотно-временные комплексы и внутренние циклы соответствующих уровней могут быть определены и разделены в соответствии с такими атрибутами, как f_c , f_r , f_v и т.д.

Примеры реальных данных

Рис. 11 является примером применения частотных характеристик сейсмической трассы f_s , характера узла, f_b , f_c , f_e и f_v для разделения частотно-временных циклов скважины Gan-119. Используемые сейсмические трассы относятся к области, близкой к скважине Gan-119, в центральном бассейне Songliao. Двусторонняя временная мощность целевых формаций интервала Qing-3 (Таблица 2) составляет примерно 200 мс, соответствуя глубинной мощности приблизительно 385 м. Подшвы песчаных слоев были откальчированы посредством преобразования времен в глубины. Можно сравнить наше разделение сейсмического цикла с осадочными циклами и стратиграфическими характеристиками, отмеченными в скважине.

- а) Используя сложные структурные типы частотных диаграмм: веер (комплекс) - дерево (симплекс) - лепесток (комплекс) - лепесток (комплекс), можно выделить структурно-типичные средне-короткопериодные частотно-временные комплексы C_1 , C_2 , C_3 и C_4 ; их границы определены V-образной структурой (Таблица 3, I на Рис. 11). Кроме того, используя характер узлов, можно определить 11 структурно-узловых типов короткопериодных частотно-временных комплексов C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{21} , C_{22} , C_{23} , C_{31} , C_{32} , C_{41} , C_{42} и C_{43} (Таблица 3, II на рис. 11). Они соответствуют средне-короткопериодным и короткопериодным стратиграфическим циклам скважины. Структурно-типичных средне-

короткопериодные частотно-временные комплексы главным образом отражают вертикальные изменения зернистости горных пород в низких и низко-средних частотных диапазонах, а структурно-узловые типы короткопериодных частотно-временных структур главным образом измеряют тенденцию изменений мощностей слоев.

- б) Уровни разветвления частот, вертикальное изменение f_v каждого частотного диапазона и различное соответствие частот различных диапазонов литологии и мощности могут использоваться для градуировки зернистости, прослеживания и определения относительных изменений мощности слоев (Таблица 2). Для сложных структур, принадлежащих каждому комплексу, чем более разветвлены узлы, тем больше дифференциация и больше изменение зернистости или мощности слоев можно наблюдать в пределах комплекса и между комплексами различного уровня (C_1 , C_4 — серии спектров с древовидной формой). Если это разветвление не замечено, это означает, что вертикальная зернистость изменяется равномерно в пределах одного комплекса или есть только незначительная разность уровня, или внутренние слои слишком тонки (тонкие прослойки) с постепенным переходом зернистости между смежными комплексами. В этом случае, в рассматриваемом частотном диапазоне распознавание не эффективно (C_2 серия спектров линейной формы). Вертикальные серии на рис. 11, 1 2 3 и 4 представляют соответственно вертикальные изменения f_v на узлах 4 уровня частотных диапазонов: 8-15 Гц (низкие частоты), 15-35 Гц (средне-низкие частоты), 40-65 Гц (средние частоты), и 70-115 Гц (средне-высокие частоты). Узлы 1 и 2 уровней из низко и средне-низких частотных диапазонов - вообще в пределах диапазона воздействия литологии, и как только f_v увеличивается с уменьшением глубины, (i) узловые циклы первого уровня могут быть разделены на ряд из четырех

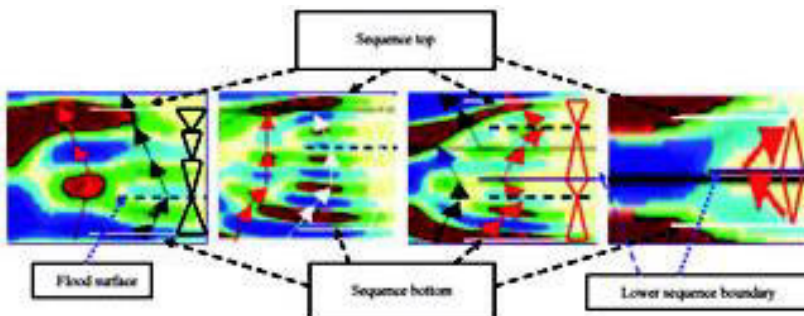


Рис. 10 *Разделение средне-короткопериодного, короткопериодного и очень короткопериодного частотно-временного цикла с использованием частотной характеристики f_1 средне-высоких и высоких (более 60 Гц) частотных диапазонов.*

слоев разной зернистости, который соответствуют четырем средне-короткопериодным частотно-временным комплексам C_1 , C_2 , C_3 и C_4 (тонкие слои 3 или 4 уровня), и вертикально от C_1 (Sqn-12 - Sqn-9lower) C_2 (Sqn-9upper - Sqn-6lower) C_3 (Sqn-6upper - Sqn-4lower) C_4 (Sqn-4upper - Sqn-1) общая зернистость получается более мелкой, что является совершенно совместимым с литологическим отличительным признаком, наблюдаемым в скважинах; (ii) Узловые циклы 2 уровня могут быть разделены на 6 рядов зернистых слоев (Sqn-12 - Sqn-Sqn-10upper - Sqn-8upper - Sqn-6lower, Sqn-12 - Sqn-10lower, Sqn-Sqn-1), каждый из которых должен быть переходным частотно-временным комплексом от средне-короткопериодных к короткопериодным. Большинство узлов 3 и 4 уровня средне-высоко- и высокочастотных диапазонов находятся в пределах диапазона воздействия мощности слоев, с изменениями мощности внутренних слоев в самых высокоскоростных комплексах C_1 , C_3 , C_4 .

Например, узлы 3 уровня могут выявлять ряды I-XI мощностей слоев, которые грубо соответствуют 11 короткопериодным частотно-временным комплексам (группы парасеквенций и песчаные группы): C_{11} тех, C_{12} , C_{13} , C_{21} , C_{22} , C_{23} , C_{31} , C_{32} , C_{41} , C_{42} и C_{43} , среди которых C_{13} (Sqn-9), C_{12} (Sqn-10) и C_{11} (Sqn-12) в C_1 , C_{31} (Sqn-4) и C_{32} (Sqn-5) в C_3 , C_{41} (Sqn-3), C_{42} (Sqn-2) и C_{43} (Sqn-3-1-2, регионально не прослеживаются) в C_4 , и C_{22} (Sqn-7, нефтеносный горизонт) в C_2 , содержат хорошие тонкие пласты-коллекторы, определяемые частотным анализом, и они примерно соответствуют более ранним прогнозам (Таблица 2) для подходящей группы (Sqn-8, Sqn-9, Sqn-10, Sqn-3, Sqn-2, Sqn-7) в изучаемой области.

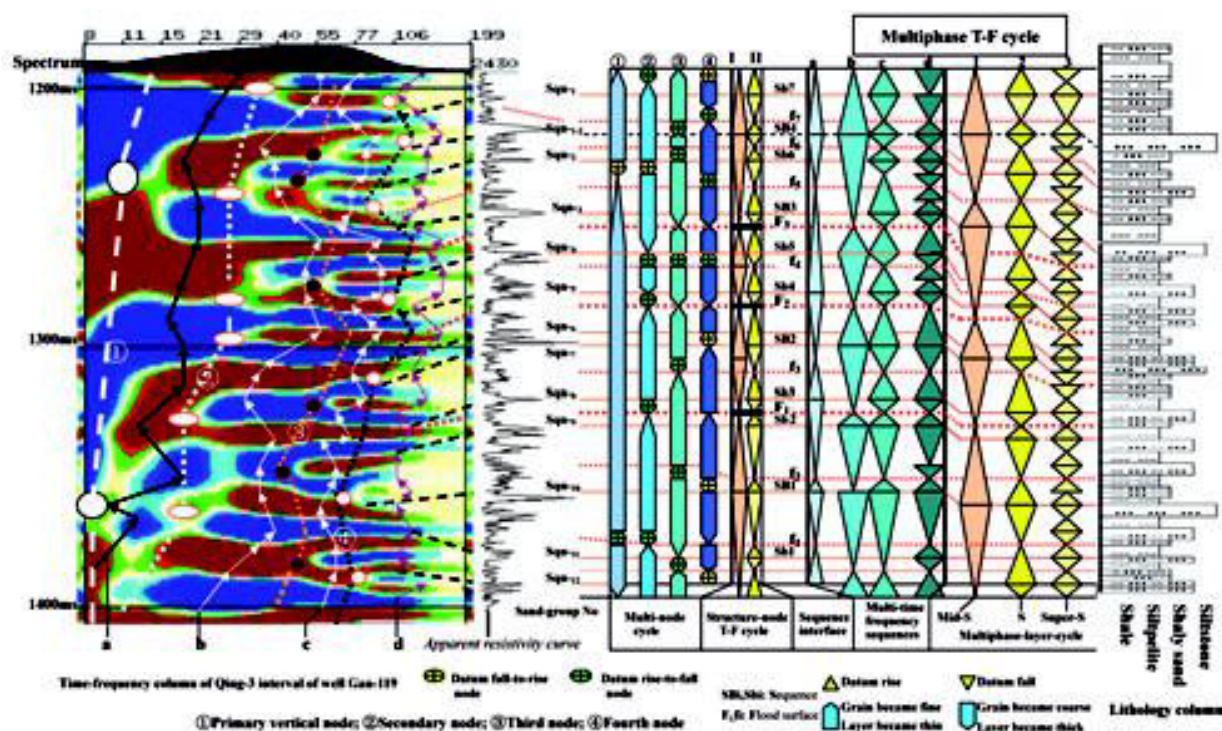


Рис. 11 Зависимость между делением частотно-временных циклов на структуры формы веера, лепестка и дендрита и осадконакоплением в некоторых нижнемеловых сериях Китая. На рис. 11, 1, 2, 3 и 4 соответствуют первому, второму, третьему и четвертому узловым циклам таблицы 2 (определенным по характеру разветвления частотных ветвей), распределенным в частотных диапазонах 8-15 Гц, 15-35 Гц, 40-65 Гц и 70-115 Гц. В низко и средне-низкочастотных диапазонах (главным образом влияет литология), целевой горизонт может быть разделен на подслои различной зернистости, используя узловые циклы; в средне-высоких и высокочастотных диапазонах (главным образом влияет мощность), целевой горизонт может быть разделен на подслои различных мощностей, используя узловые циклы. Структурно-типовые средне-короткопериодные частотно-временные циклы I из рис. 11 разделены на составные структуры, узлы 1 и 2 уровня в низко и средне-низком частотном диапазонах; структурно-типовые короткопериодные частотно-временные циклы II разделены по структурному типу, узлы 3 и 4 уровня в средне-высоком и высокочастотном диапазонах. Кривые циклов a, b, c, и d в левой стороне рис. 11 и картина соответствующих изменений поверхности осадконакопления, приведенная справа, показывают направление изменений детализированных отличительных признаков в пределах циклов различных периодов. Частотные полосы, которые они занимают: 8-29 Гц для a, 30-55 Гц для b, 56-95 Гц для c, и больше чем 95 Гц для d. С помощью f_s как доминирующего фактора, среднечастотные и средне-короткопериодные циклы в a и b разделены согласно величине f_s , короткопериодные циклы в c — согласно f_i и f_o , очень короткопериодные циклы в d — согласно эффективной частоте частотной ветви и f_o . На рис. 11 мы можем видеть, что кровли и подошвы многоуровневых частотно-временных комплексов в a, b, c и d в основном совместимы с определенными в I и II.

- с) Разделение среднепериодных, средне-короткопериодных, короткопериодных и очень короткопериодных частотно-временных комплексов (циклов) сделано при использовании f_t , f_e и f_s , согласно частотному диапазону (рис. 11: a-d). Критерия идентификации различных видов поверхностей раздела включают: экстремальные точки f_t , f_e ; для внутренних поверхностей раздела комплексов (затопленная поверхность); частотный диапазон для того, чтобы определять уровень поверхности раздела комплексов; то же самое, что и для разделения скважинных комплексов, где поверхности раздела групп и число короткопериодных комплексов (с на рис. 11) и очень короткопериодных (d на рис. 11) частотно-временных комплексов в основном сопоставимы с теми (2 и 3 на рис. 11), которые соответствуют скважинам (Таблица 3). По сравнению с очень короткопериодными скважинными комплексами, разрешающая способность по частоте очень короткопериодных частотно-временных комплексов для отдельных слоев в пределах групп менее точна. Сравнительно, разбиение частотно-временных комплексов в секции с более точно, чем это сделано в а, особенно для средне-короткопериодных и короткопериодных, но центры двух на реакции слоев немного отличны.

Пример для демонстрации соответствия отклика на трассе (CDP2430) около скважины Gan-119 и на трассе (CDP2300), находящейся на расстоянии в 1300 м приводится на рис. 12. В низко и средне-низкочастотных диапазонах ($F < 60$ Гц) структура частотно-временного спектра двух трасс в пределах 1000-1100 мс в основном подобны. Это указывает на то, что региональная среда диагенеза в данном периоде является установившейся. В средне-высоких и высокочастотных диапазонах ($F > 60$ Гц), структура частотно-временного спектр двух трасс становится различной. Например, для $60 \text{ Гц} < F < 90 \text{ Гц}$, короткопериодные циклы (полный цикл вздыманий и опусканий плюс полужикл поднятия поверхности осадконакопления) в пределах 1035-1085 мс для двух трасс в основном одинаковы, тогда как для окна 1008-1035 мс они различаются следующим образом:

а) Формация А (CDP2300, период времени: 1015-1035 мс) полностью состоит из трех структур низкого уровня плюс простирающаяся часть частотной ветви высокого уровня и цикла, который подвергся процессам от агградации (нет изменения поверхности осадконакопления) до проградации (есть полужикл изменения поверхности осадконакопления). Формация А' (CDP2430, период времени: 1008-1030 мс), состоит из простирающейся части лепестковой частотной ветви плюс полная лепестковый частотная ветвь низкого уровня, и цикл подвергся

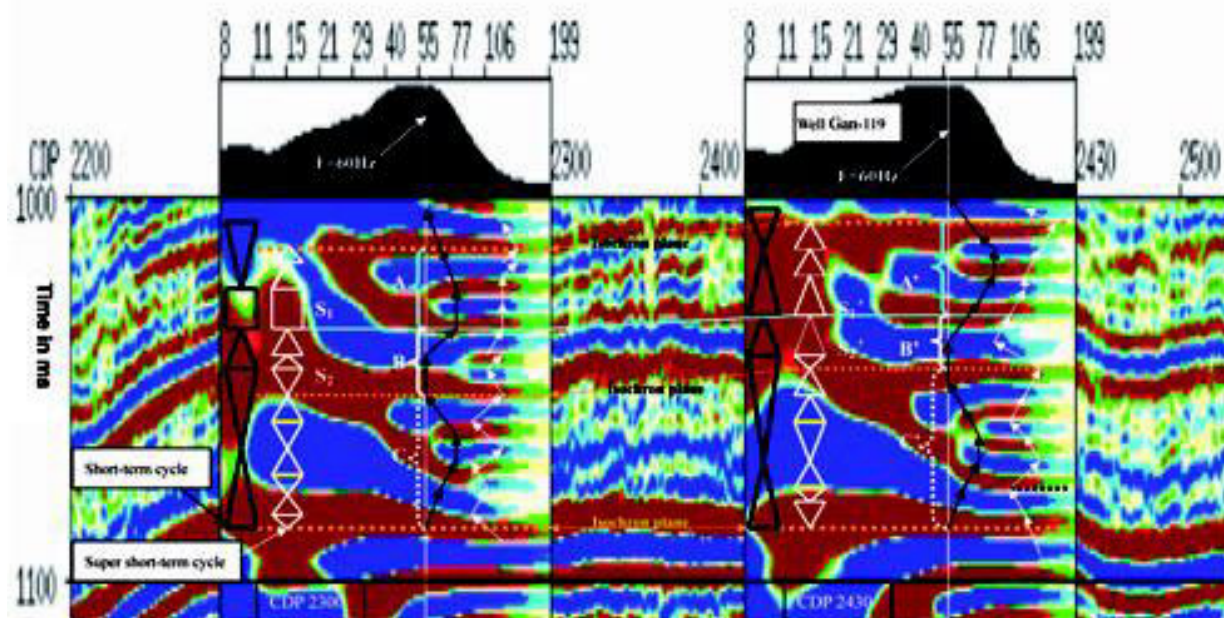


Рисунок 12 Многофазные циклы, полученные для околоскважинных трасс: (CDP2430) и (CDP2300)— удалена на 1300 м от первой по сейсмическому профилю (130 ОГТ). Базисное возвышение, ретроградация, зернистость уменьшается; базисное опускание, проградация, зернистость укрупняется; □: неочевидные изменения поверхности осадконакопления и зернистости; S_1 , S_2 , S_1' , S_2' : тонкие песчаные коллекторы развивались, когда поверхность вздымалась; А(А'), В (В'), С (С'): формации, соответствующие двум трассам ОГТ; Черная стрелка: вертикальное изменение f_e средне-высокочастотных диапазонов (направлена налево: f_e растет; направлена направо: f_e уменьшается); Белая стрелка: вертикальные изменения f_t и эффективной частоты частотной ветви высокочастотных диапазонов (направлена налево: f_t или эффективные частоты растут; направлена направо: f_t или эффективные частоты падают).

полному процессу от регрессии (базисное возвышение) до проградации (базисное опускание).

- о б) Формация В (CDP2300) — серия проградации плюс ретроградация плюс ретроградация, а формация В' (ОГТ 2430) — серия проградации плюс ретроградация. Соответствующий частотный диапазон очень короткопериодных циклов В относительно более высокочастотный, чем для В'; таким образом зернистость В является относительно более мелкой чем у В'. Кроме того, в течение формирования В', седиментация — медленный процесс в относительно сильных гидродинамических условиях с установившимся колебаниями уровня поверхности осадконакопления, но для В, процесс относительно быстр при относительно слабых гидродинамических условиях и частых базисных изменениях. Поэтому В' дает лучшую градацию зернистости, сохранение резервуара, мощность залежи и качество уплотнения.

Выводы

Это предварительное исследование демонстрирует, что хорошее (качественное и полуколичественное) соответствие частотных характеристик сейсмической трассы (например, свойства узлов, f_s , f_b , f_c , f_v и т.д.) параметрам слоев (толщина, зернистость, поверхность раздела комплексов, внутреннее строение и расположение комплексов и т.д.) может служить базисом геологической интерпретации посредством сейсмических частотных характеристик, и как новая идея и инструмент исследования для обработки сейсмических данных с высокой разрешающей способностью и интерпретации.

Путем применения различных сейсмических частотных характеристик, мы в состоянии разделить длиннопериодные, различные комплексы для определения внутреннего строения и некоторых деталей комплексов более низкого уровня, и предсказать маломощные резервуары более точно.

В дополнение к методу частотно-временного анализа, упомянутому в данной статье, мы сравнили прогнозирующие следствия других методов, таких как прогноз резервуара, различные методы исследования атрибутов, совместили многопараметровую инверсию импеданса, кажущегося удельного сопротивления, естественного электрического потенциала, и т.д., и нашли, что метод частотно-временного анализа дает лучший прогноз, чем другие методы для толщин песчаных слоев, распределения и микрофаций осадконакопления целевых горизонтов области исследования. К сожалению, на сегодняшний день у нас нет примеров в области прогноза стратиграфии комплексов, сделанного перед бурением каких-то скважин.

В настоящее время высокоточная сейсмогеологическая интерпретация тонких прослоев при использовании только сейсмических частотных характеристик ограничена и не единственная, и необходимы другие идеи для повышения точности интерпретации. Более того, метод, представленный в данной статье пока что находится в стадии разработки. Много работы должно быть сделано, прежде чем он станет более мощным.

Благодарности

Благодарим доктора Mike Bacon из Отдела редакции за его ценные и конструктивные предложения по улучшению качества рукописи.

Ссылки на литературу

- Bahorich, M. [2002] Amplitude responses image reservoir: Seismic advances. *Hart's E & P*, (1), 59-61.
- Boashash, B. [1991] Time-frequency signal analysis. In: *advances in spectral estimation and processing* (S. Haykin, Ed.), Prentice-Hall, 418-517.
- Cohen, L. [1989] Time-frequency distribution -- a review, *Proc. IEEE*, 77(7), 941-981.
- Cross, T.A. and Baker M.R. [1993] Application of High-resolution Sequence stratigraphy to Reservoir Analysis, *Proceedings of the 7th Exploration and Production Research Conference*. Paris, 11-33.
- Du, S. [1998] Seismic sequence model and high-resolution seis- mic processing. *Advances in hydrocarbon exploration series* (in Chinese). Petroleum Industry Press, Beijing. 3 (3), 17-23.
- Jin, F. [1988] Application requirements of seismic stratigraphy in continental basins, *Oil Geophysical Prospecting*, 3, 330-345.
- Ling Yun Project. [2004] Calibration study of logging and seis- mic data. *Oil Geophysical Prospecting*, No.1, 68-74.
- Li, Q. [1987] Frequency and amplitude properties of the oil-bearing sand layers. *Oil Geophysical Prospecting*, 1, 1-23.
- Mahradi, [1983] Physical modelling studies of thin beds. *M.Sc. Thesis*, University of Houston.
- Meckel, L.D., and A.K. Nath. [1977] Geologic considerations for stratigraphic modeling and interpretation. In *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG, Tulsa, 417-438.
- Mushen, I.A., [1992] Lecture notes on structural sequence interpretation of seismic, well logging, and other geophysical data. China Petroleum University.
- Mushen, I.A., Makarov, V.V., Kozlov, E.A., and Lowrie, A. [2000] Structural-formational interpretation tools for seismic stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 48, 953-981.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P. [1999] *Exploration Seismology* (Chinese version). Petroleum Industry Press, Beijing.
- Wang, Y. [2000] Structure-sequence model and its seismic response. *Proceedings of international symposium on hydro- carbon exploration in complex areas*. China Petroleum University, 164-168.
- Widess, M. B. [1973] How thin is a thin bed? *Geophysics*, 38, 1176-1180.
- Williams, W.J. and Jeong, J. [1989] New time-frequency distribution: theory and applications. *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*. 2, 9, 1243-1247.
- Yin, X., Zhang, K., and Zhang, G. [2003] Combined time-frequency distribution and attribute application. *Oil Geophysical Prospecting*, 5, 522-526.
- Yang, H. [1988] Influence of thin layer response upon reflections. *Oil Geophysical Prospecting*, 3, 287-293.