

УДК 550.8.053

КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА МЕТОДАМИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В.П. Иванченков, А.А. Козлов

Томский политехнический университет
E-mail: alexi3@sibmail.com

Рассматриваются вопросы разработки алгоритма прогноза типа геологического разреза по результатам фазовременного анализа сейсмических наблюдений и применение для этих целей методов кластерного анализа.

Ключевые слова:

Фазочастотная характеристика, функция качества, компактность кластера, алгоритм прогноза геологического разреза, энергетический спектр.

Key words:

Phase-frequency characteristic, merit function, cluster compactness, algorithm of geologic profile prognosis, energy spectrum.

Понятие типа геологического разреза природного резервуара, является одним из важнейших представлений, сложившихся в геофизике последние годы [1]. В рамках этого представления под типом разреза понимается специфическая совокупность литологических разностей пород в определенном стратиграфическом диапазоне. На изучаемом объекте (месторождении, разведочной площади) типы разреза, значимо различающиеся литолого-фациальными особенностями и петрофизическими характеристиками, могут быть выделены по результатам анализа данных бурения, геофизического исследования и испытания скважин. Возникает задача прогнозирования распространения этих типов разреза в пределах исследуемой площади, меж- или околоскважинном пространстве по данным сейсмических наблюдений.

До последнего времени для прогноза геологического разреза наиболее широко использовались энергетические характеристики отражённых сейсмических волн. Значительно в меньшей степени для решения задач прогноза привлекаются их фазочастотные характеристики. Между тем в фазовые спектры сейсмических волн заложена важная информация о местоположении отражающих границ, скорости распространения волн, плотности пород, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых сред. На этой основе удаётся синтезировать ряд фазочастотных алгоритмов обработки сейсмических данных, позволяющих в условиях априор-

ной неопределённости относительно формы исследуемых волн обнаруживать и разрешать сигналы на фоне интенсивных помех, получать надёжные оценки их параметров [2, 3].

В данной статье рассматриваются вопросы применения методов кластерного анализа для прогноза типов геологического разреза, сформированных по данным обработки сейсмических наблюдений. В [4] для выделения и картирования типов геологического разреза был предложен метод фазовременного анализа (ФАН-анализа). Предварительно отметим основные принципы ФАН-анализа и особенности его применения в задаче прогнозирования типов геологического разреза. При проведении ФАН-анализа для каждой анализируемой сейсмической трассы волнового поля формируется совокупность функций качества:

$$L_k(\tau) = \sum_m^n w_k(f_m) \cos[\varphi(f_m, \tau)], \quad (*)$$

где $w_k(f)$ – специально подобранные частотные весовые функции при k -м изменении их частотных параметров; $\varphi(f, \tau)$ – мгновенный фазовый спектр участка сейсмотрассы, выделяемого при перемещении окна анализа вдоль её реализации; τ – местоположение окна анализа при его перемещении вдоль трассы; n – число учитываемых гармоник; $m=1, 2, \dots, n$ (рис. 1). Частотные параметры весовой функции целенаправленно изменяются в процессе ФАН-анализа.

В качестве весовой функции при ФАН-анализе используется треугольная функция:

$$w_k(f) = \frac{4}{3f_c^k} \begin{cases} 0, & f \leq f_H^k, f > f_B^k \\ \frac{2}{f_c^k}(f - f_H^k), & f_H^k < f \leq f_c^k \\ -\frac{1}{f_c^k}(f - f_B^k), & f_c^k < f \leq f_B^k \end{cases},$$

где f_H^k, f_B^k – нижняя и верхняя частоты k -й весовой функции, f_c^k – частота максимума функции $w_k(f)$.

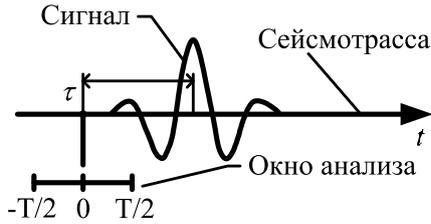


Рис. 1. Текущее положение скользящего окна в процедуре фазовременного анализа; T – длительность окна анализа

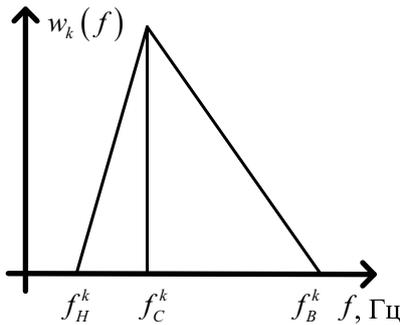


Рис. 2. Вид весовой функции

Вид треугольной весовой функции (фильтра) представлен на рис. 2. Параметры $w_k(f)$ при ФАН-анализе в выражении (*) изменяются так, чтобы центральная частота f_c^k функции удовлетворяла соотношению:

$$f_c^k = \frac{f_B^M - f_H^1}{(M-1)^p} (k-1)^p f_c^1,$$

где M – количество весовых функций; f_B^M – верхняя частота последнего фильтра; f_H^1 – нижняя частота первого фильтра; p – параметр крутизны. Во всех случаях для весовой функции выполняется условие нормировки:

$$\sum_m w_k(f_m) = 1.$$

Совокупность функций вида (*) образуют ФАН-колонку (ФАН-образ) для каждой сейсмотрассы, а совокупность ФАН-образов для набора сейсмотрасс, полученных в различных точках наблюдения образуют ФАН-разрез (разрез ФАН-Г). Различия в таких важных свойствах толщ, как мощность, пористость, проницаемость, поглощение, не вызывают заметных изменений в сейсмической трассе, отражаются в ее ФАН-образе. При этом ФАН-образы, которые определяются закономерностями распределения амплитуд функции качества в координатах частота-время, будут различаться рисунком записи, количеством, протяженностью, интенсивностью, взаимным расположением, наклоном выделяемых осей синфазности, присущим им частотным диапазонам. Такая чувствительность ФАН-образов к изменению структурных и петрофизических свойств среды позволяет использовать их как основу для построения методики прогноза типа геологического разреза.

На основе ФАН-анализа был разработан алгоритм прогноза типов геологического разреза (рис. 3).

В процессе обработки сейсмических материалов предварительно находят ФАН-образы в точках расположения скважин в заданном интервале глубин. На основе имеющихся данных геофизического исследования скважин, результатов их испытаний, выделенные ФАН-образы классифицируют по типам геологического разреза и рассматривают при прогнозе как эталонные. Далее для различных точек наблюдения в межскважинном пространстве находят анализируемые ФАН-образы и строят разрезы ФАН-Г. Образы на разрезах ФАН-Г сопоставляют с эталонными ФАН-образами, полученными в точках расположения скважин. На этой основе выносятся решение о распространении определенного типа геологического разреза в межскважинном пространстве.

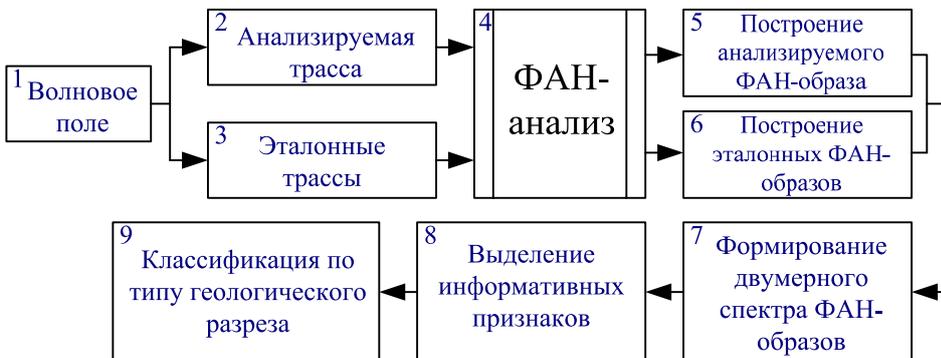


Рис. 3. Обобщённая структурная схема алгоритма прогноза типа геологического разреза в межскважинном пространстве

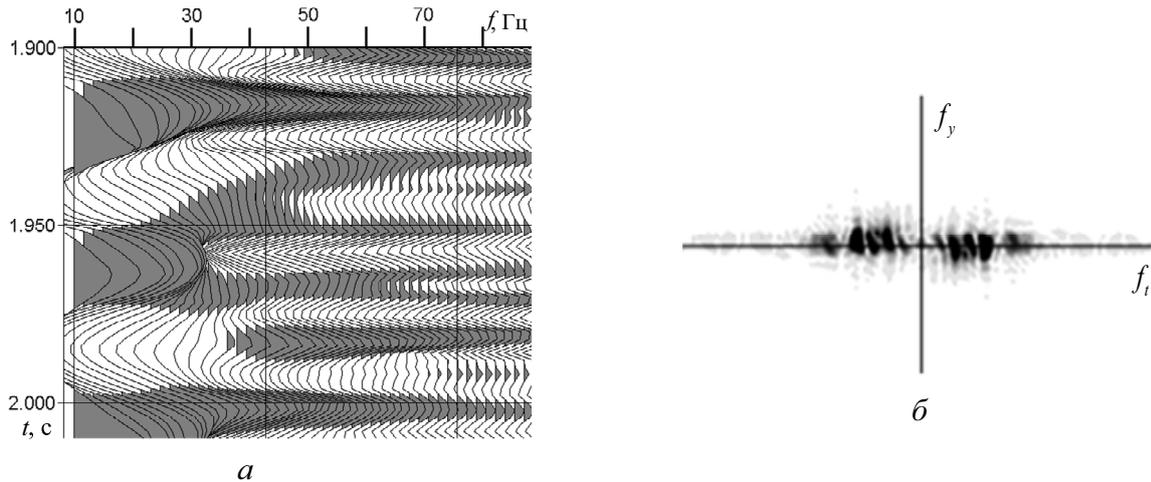


Рис. 4. ФАН-образ (а) и его энергетический спектр (б)

В предложенном алгоритме для выделения информативных признаков на этапе классификации определяется двумерный энергетический спектр сформированных изображений ФАН-образов:

$$|G(f_t, f_y)|^2 = \left| \iint f(t, y) e^{-j2\pi[f_t t + f_y y]} dt dy \right|^2,$$

где $f(t, y)$ – функция, характеризующая изображение исследуемого ФАН-образа. В энергетическом спектре изображений ФАН-образов находят отображение распределения энергий гармоник по частотам, а также направления осей синфазности, имеющихся на анализируемом изображении. В качестве примера на рис. 4 показан сформированный ФАН-образ (а) и его энергетический спектр (б).

Информативные вектора, соответствующие различным ФАН-образам, формируются с помощью специально синтезированных масок. Если обозначить через s_i элемент Фурье-плоскости, соответствующий i -й области разбиения, то i -я составляющая вектора признаков будет иметь вид:

$$x_i = \frac{\iint_{s_i} |F(f_t, f_y)|^2 df_t df_y}{\iint_{-\infty -\infty}^{\infty \infty} |F(f_t, f_y)|^2 df_t df_y},$$

где $i=0, 1, \dots, N-1$; N – число областей разбиения. В результате анализа структуры двумерных спектров ФАН-образов было синтезировано и опробовано две маски: секторная и полосовая (рис. 5).

Для проведения классификации выделенных векторов признаков ФАН-образов применялись методы кластерного анализа [5]. Из известных методов кластерного анализа для исследования были выбраны два алгоритма: алгоритм, основанный на анализе изменения компактности кластеров вектор-признаков анализируемых ФАН-образов и алгоритм, основанный на вычислении расстояния между центрами двух эталонных кластеров и вектор-признака анализируемого ФАН-образа. Каждый из двух алгоритмов был исследован на дискриминационную способность.

Критерий принятия решения по методу анализа компактности кластера можно записать:

$$\frac{1 - D_{\Sigma}^A}{D_{\Sigma}^B} \cdot 100 \leq \Omega_n, \quad \%,$$

где $D_{\Sigma}^A = \sum_{k=0}^{J-1} D_k^A$ – компактность анализируемого

кластера A , $D_k^A = \sum_{i=0}^{N-1} (X_{i,k}^A - \bar{x}_k^A)^2 / N$ – групповая дисперсия для всех вектор-признаков кластера

по k -й характеристике измерения, $\bar{x}_k^A = \sum_{i=0}^{N-1} X_{i,k}^A / N$ –

групповая средняя k -й характеристики измерения кластера, $X_{i,k}$ – матрица векторов признаков кластера (i – номер вектора; k – номер признака), $i=0, 1, \dots, N-1$, $k=0, 1, \dots, J-1$, N и J – количество и размерность векторов, B – эталонный кластер, A – кластер дополненный вектор-признаком трассы с неизвестным типом разреза, Ω_n – пороговое значение критерия.

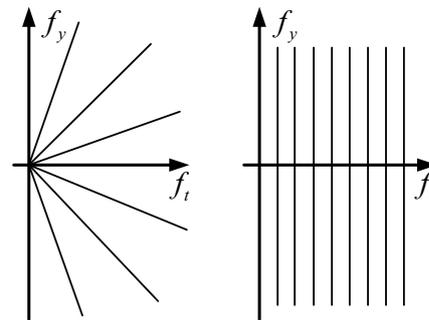


Рис. 5. Секторная и полосовая маски Фурье-плоскости изображений

Так, задавая эталонный кластер, например, нефтенасыщенной толщи, вычисляем его компактность D_{Σ}^A , далее дополняя его вектор-признаком трассы с неизвестным типом разреза, пересчитываем компактность кластера D_{Σ}^B , в случае её увеличения более чем на Ω_n % относим трассу к дру-

гому неизвестному типу разреза, в противном случае к эталонному.

Критерий принятия решения по методу ближайшего расстояния между центрами кластеров представляется:

$$\varepsilon = \min(l_A; l_B),$$

где $l_A = \sum_{i=0}^{J-1} (\bar{a}_i^A - c_i)^2$ и $l_B = \sum_{i=0}^{J-1} (\bar{b}_i^B - c_i)^2$ – квадраты

евклидовых расстояний между центрами эталонных кластеров и анализируемой точкой c в

J -мерном пространстве признаков, $\bar{a}_k^A = \sum_{i=0}^{N-1} X_{i,k}^A / N$

и $\bar{b}_k^B = \sum_{j=0}^{M-1} X_{j,k}^B / M$ – соответственно координаты

центров эталонных кластеров A и B , $k=0, \dots, J-1$, N и M – количество векторов кластеров. В соответствии с этим критерием тип разреза анализируемой трассы будет определяться типом разреза ближайшего кластера.

Исследование алгоритмов прогноза типов геологического разреза осуществлялось на моделях слоистых поглощающих сред с горизонтальными границами раздела. В основу формирования модели на ПЭВМ были положены теоретические положения, принятые для слоистых поглощающих сред, изложенные в [6]. Обобщённая структура принятых моделей среды и петрофизические параметры отдельных толщ приведены в таблице (скорость распространения продольной волны v , плотность пород ρ , параметр поглощения β , мощность слоя h).

В моделях число отражающих толщ было задано равным восьми. В зависимости от свойств продуктивной толщи (слой песчаника) различались четыре модели среды, которые определяли тип разреза. В первой модели песчаный слой предполагался насыщенным газом, во второй – нефтью, в третьей – водой. В четвёртой модели имитировалось наличие непроницаемого карбонизированного песчаника. В зависимости от типа разреза в достаточно широких пределах варьировались петрофизические ха-

рактеристики продуктивной толщи. Исследование проводилось для мощностей продуктивной толщи 20 и 40 м. Результаты исследования на моделях показали, что алгоритм анализа компактности кластера достаточно надёжно классифицирует различные типы геологического разреза; вероятность правильной классификации привысила 80 %. Дискриминационные способности метода анализа ближайшего расстояния между центрами кластеров хуже, чем у метода анализа компактности кластера; вероятность принятия правильного решения при классификации составила $\approx 77,5$ %. Предложенный алгоритм прогноза типа геологического разреза был опробован при обработке данных сейсмического метода общей глубинной точки, полученных на одном из нефтяных месторождений Томского Приобья. Исходя из проведённых исследований, в качестве метода классификации был использован алгоритм анализа компактности кластера.

Таблица. Численные значения параметров модели

Модель	v , м/с	ρ , г/см ³	β , 10 ⁻⁶ , с/м	h , м
Верхний слой	2500	2,60	20	200
Аргиллиты	2700	2,50	10	20
Слой песчаника				
Аргиллиты	3000	2,60	10	10
	3100	2,60	14	10
	3200	2,65	13	10
	3100	2,55	14	10
	3000	2,50	15	10
Нижний слой	3000	2,60	15	∞

Для продуктивного горизонта верхней Юры выделялись отражения от его границ. Рассматривалась толща, ограниченная подошвой Баженовской свиты (Bg) и кровлей Тюменской свиты (Тм), (рис. 6, а). Осуществлялась обработка временного разреза общей глубинной точки, полученного для одного сейсмического профиля, на котором расположены скважины Скв-1 и Скв-2. Скв-1 является продуктивной скважиной с большим дебитом нефти (130 м³/сут). В Скв-2 получен приток нефти с водой с дебитом 12 м³/сут. При исследовании за эталонные типы разреза приняты разрезы, выде-

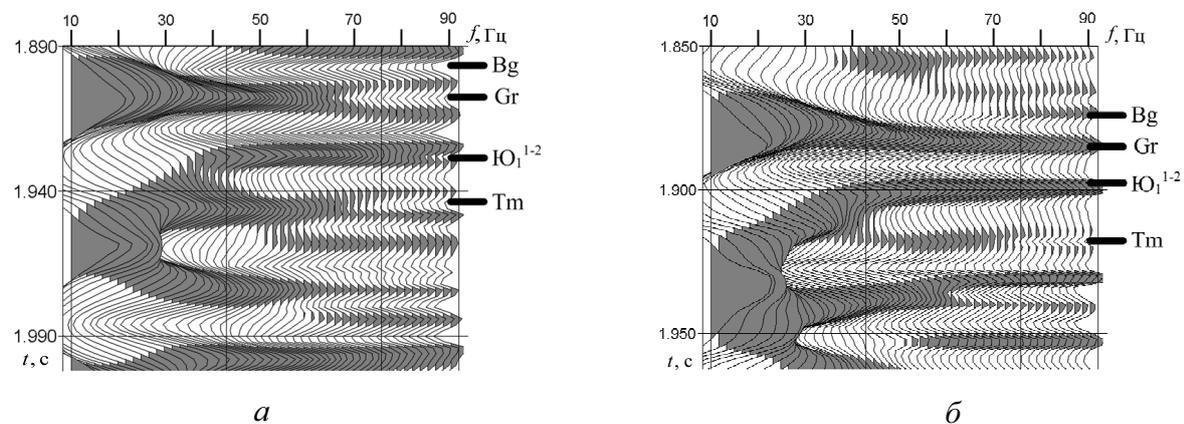


Рис. 6. Эталонные ФАН-образы, выделенные на Скв-1 (а) и Скв-2 (б)

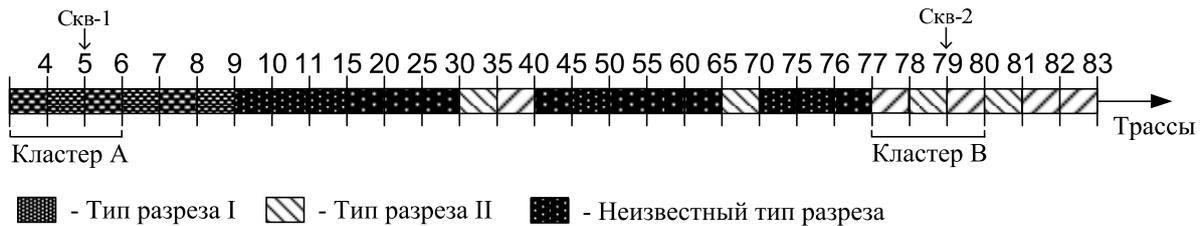


Рис. 7. Прогноз распространения типов разреза в межскважинном пространстве

ленные в отложениях верхней Юры на скважинах Скв-1 и Скв-2. Решалась задача прогноза этих типов разреза в межскважинном пространстве. Скв-1 расположена на 5-м пикете наблюдения, Скв-2 — на 79-м пикете наблюдения. В процессе обработки для суммотрасс общей глубинной точки, соответствующих положению Скв-1 и Скв-2, формировались ФАН-образы, которые были приняты за эталонные рис. 6. Далее для суммотрасс, зарегистрированных на различных пикетах наблюдения, вдоль анализируемого профиля, были получены ФАН-образы, которые классифицировались в соответствии с рассмотренной ранее методикой прогноза. За эталонные кластеры были приняты кластеры А и В, выделенные на Скв-1 (тип разреза I) и Скв-2 (тип разреза II).

Прогноз распространения типов разреза, выделяемых на трассах на Скв-1 и Скв-2 в межскважинном

пространстве, представлен на рис. 7. Выделенные I и II типы разреза распространяются вдоль профиля вблизи Скв-1 и Скв-2 примерно на 130 м. Визуальный анализ принадлежности выделенных типов разреза с привлечением экспертов с данными автоматической классификации с использованием метода компактности кластера (рис. 7) показал их хорошее согласование. Это в определённой степени свидетельствует о надёжности используемого метода классификации. Предполагается опробовать предложенную прогнозную методику на более широком наборе полевого материала.

Предложенный алгоритм прогноза типа геологического разреза внедряется в программно-алгоритмические комплексы «Геосейф» и «Геосейф-ВСП», предназначенные для обработки данных наземной и скважинной сейсморазведки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Славкин В.С., Копилевич Е.А., Давыдова Е.А., Мушин И.А. Методика картирования типов геологического разреза в межскважинном пространстве по данным сейсморазведки // Геофизика. — 1997. — № 2. — С. 21–24.
2. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Фазочастотные алгоритмы оценки местоположения пространственно-временных сигналов в условиях априорной неопределенности // Известия вузов. Физика. — 1995. — № 9. — С. 100–104.
3. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. — 1988. — № 9. — С. 77–83.
4. Иванченков В.П., Вылегжанин О.Н., Козлов А.А. и др. Методы фазочастотного анализа волновых полей и их применение

в задачах обработки данных сейсморазведки // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 7. — С. 65–70.

5. Дюран Б., Одел П. Кластерный анализ. — М.: Статистика, 1977. — 185 с.
6. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Фазочастотные характеристики сейсмических волн и основные предпосылки их применения для решения задач прогноза геологического разреза // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 313. — № 5. — С. 132–137.

Поступила 13.10.2010 г.