

УДК 550.834

ПРОГНОЗ ТИПОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА ОСНОВЕ ФАЗОВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Иванченков Виктор Павлович¹,
am@am.tpu.ru

Кочегуров Александр Иванович¹,
kaicc@tpu.ru

Нгуен Суан Хунг¹,
hungnx@tpu.ru

Орлов Олег Викторович¹,
orloff.oleg@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы. При решении задач прогноза геологического разреза, в том числе прогноза нефтегазоносности осадочных толщ, по данным сейсмических наблюдений наиболее широко используются в качестве диагностических признаков динамические характеристики отраженных волн, непосредственно связанные с их амплитудой и энергией. Информация о свойствах фазочастотных характеристик сейсмических волн до последнего времени практически не использовалась. Между тем в фазу сейсмических сигналов, а точнее в сложный закон изменения их фазовых спектров, заложена информация о положении границ раздела анализируемых толщ, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых геологических сред. Поэтому фазочастотные характеристики отраженных волн могут быть использованы в качестве важных диагностических признаков при прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ.

Цель исследования: разработать алгоритма прогноза и картирования типов геологического разреза на основе метода фазовременного анализа (ФАН-анализ) сейсмических записей; исследовать эффективность данного алгоритма на моделях геологических сред и опробовать его применение для обработки и интерпретации материалов ОГТ, полученных на Конторовичском нефтяном месторождении.

Методы исследования: цифровая обработка пространственно-временных сигналов и полей, методы дискретного преобразования Фурье, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Результаты. Показана возможность извлечения полезной информации из фазочастотных характеристик сейсмических сигналов для формирования диагностических признаков при прогнозе геологического разреза. На основе выбранных признаков разработан метод фазовременного анализа сейсмических записей и построен алгоритма прогноза и картирования типов геологического разреза. Проведены исследования данного алгоритма на моделях слоистых поглощающих сред, а также опытная обработка и интерпретации реальных данных. Полученные результаты подтвердили перспективность применения фазовременного анализа для прогноза типов геологического разреза в межскважинном пространстве.

Ключевые слова:

Прогноз типов геологического разреза, метод фазовременного анализа, алгоритмы фазочастотного прослеживания сейсмических волн, межскважинное пространство.

Введение

При обработке и интерпретации данных сейсмических наблюдений, получаемых при поиске месторождений нефти и газа, значительное развитие в последнее время получили методы, направленные на оценку свойств исследуемого геологического разреза [1–4]. Среди широкого спектра решаемых при этом задач можно выделить задачу прогноза типов геологического разреза в около- и межскважинном пространстве [5, 6]. Для решения данной задачи наиболее широкое признание получил метод спектрально-временного анализа (СВАН), в основу которого положен алгоритм, реализующий целенаправленный перебор частотных фильтров и регистрации последовательностей амплитуд, отфильтрованных сигналов в виде так называемых СВАН-колонок [3, 7]. На изображе-

ниях СВАН-колонок в интегральной форме находят специфические отражения геологических характеристик изучаемого разреза.

При количественной классификации типов разреза в СВАН в качестве информативных параметров используются только энергетические спектры выделяемых сейсмосигналов. Информация о фазочастотных характеристиках (ФЧХ) сигналов при СВАН-анализе не используются. Между тем в фазовые спектры отраженных сейсмических волн заложена важная информация о положении границ раздела анализируемых толщ, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых геологических сред. ФЧХ отраженных волн могут быть использованы в качестве важных диагностических признаков при прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ [8–14].

Метод фазовременного анализа

В статье рассматривается метод фазовременного анализа (ФАН-анализ) сейсмических записей и разработанный на его основе алгоритм прогноза и картирования типов геологического разреза. Приводятся результаты исследования данного алгоритма на моделях слоистых поглощающих сред, а также отдельные примеры его применения при интерпретации реальных данных. Предварительно отметим основные принципы ранее предложенных фазочастотных алгоритмов прослеживания (ФЧП) сейсмических волн, на базе которых был реализован метод фазовременного анализа. Алгоритмы ФЧП были разработаны для выделения сейсмических волн и границ при решении задач структурной сейсморазведки. В общем случае функция качества (критерий оценки временного положения сигналов) этих алгоритмов имеет вид [10, 11]:

$$L(t) = \sum_{i=1}^m W(f_i) \cos[\varphi(f_i, t)], \quad (1)$$

где $W(f_i)$ – частотная весовая функция, вид которой определяет реализуемый алгоритм; $\varphi(f_i, t)$ – текущий фазовый спектр участка сейсмотрассы, вычисляемый в скользящем окне анализа.

Для равновесного алгоритма весовая функция $W(f_i)$ принимается равной единице во всей полосе анализируемых частот. Для алгоритмов с неравновесной обработкой $W(f_i)$ может быть задана, например, в виде треугольной, синусоидальной или экспоненциальной функции. Определение временного положения сигналов при этом осуществляется путем оценки местоположения экстремума функции качества (1). Исследования алгоритмов показали, что они обладают высокой помехоустойчивостью и разрешающей способностью [11]. Так, алгоритм ФЧП с неравновесной обработкой обеспечивает разрешение сигналов по вертикали порядка четверти длины волны [11].

Проведенный анализ также показал, что при прослеживании отдельного сигнала $S(t)$ функция качества ФЧП в непрерывной форме может быть представлена [15]:

$$L(t) = F^{-1}\{W(f)e^{j\varphi_s(f)}\}, \quad (2)$$

где F^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье; $\varphi_s(f)$ – фазовый спектр сигнала.

Тогда, рассматривая модель слоистой поглощающей толщи с системных позиций, простейшая схема которой приведена на рис. 1, а, получим, что при прослеживании сигнала $S_2(t)$, отраженного от подошвы поглощающего слоя II, функция качества ФЧП с учетом (2) будет равна [15]:

$$L_2(t) = L_0(t) \otimes h_L(t),$$

где $L_0(t)$ – функция качества при прослеживании падающей волны $S_0(t)$; $h_L(t) = F^{-1}\{H_L(f)\}$, $H_L(f) = e^{j\varphi_{H_2}(f)}$; $\varphi_{H_2}(f)$ – фазочастотная характеристика системы, определяющая передачу сигнала $S_2(t)$ (рис. 1, б).

Выражение для $\varphi_{H_2}(f)$ в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 1, б) после несложных преобразований можно записать:

$$\varphi_{H_2}(f) = \varphi_{r_{12}}(f) + \varphi_{k_{23}}(f) + \varphi_{H_c}(f) + \varphi_{r_{21}}(f),$$

где $\varphi_k(f)$, $\varphi_r(f)$ – соответственно аргументы комплексных коэффициентов отражения $k(f)$ и преломления $r(f)$; $\varphi_{H_c}(f)$ – ФЧХ системы, определяющей распространение волны в поглощающем слое II в двух направлениях.

Согласно [16, 17], аргументы коэффициентов отражения и преломления определяются акустическими жесткостями и поглощающими свойствами контактирующих сред. В свою очередь ФЧХ поглощающего слоя II зависит от скорости распространения волны и параметров поглощения данного слоя [16].

Отмеченная выше взаимосвязь функции качества алгоритмов ФЧП со структурными особенностями слоистых толщ и их петрофизическими параметрами послужили основными предпосылками для разработки метода фазовременного анализа. При проведении ФАН-анализа используется алгоритм ФЧП с неравновесной обработкой. Для каждой сейсмической трассы в области исследуемой толщи в соответствии с (1) формируется совокупность функций качества ФЧП:

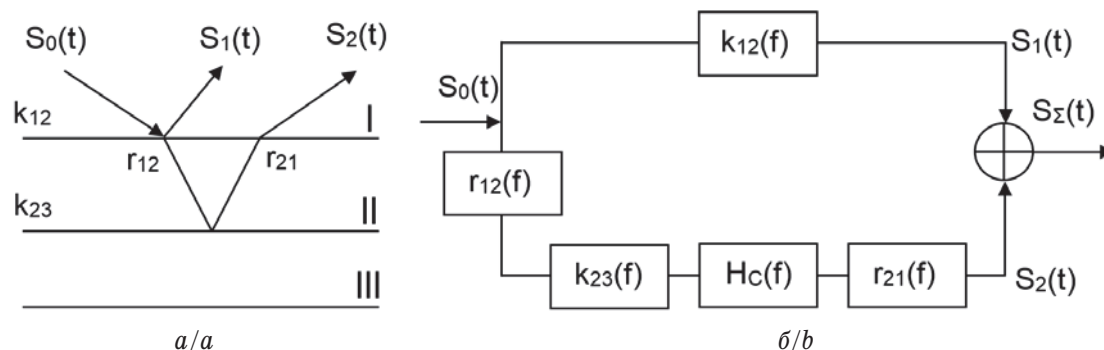


Рис. 1. Представление формирования отраженных волн в виде эквивалентной системы. а) модель среды; б) эквивалентная схема

Fig. 1. Representation of reflected waves formation in the form of an equivalent system. а) the environmental model; б) the equivalent circuit

$$L_k(t) = \sum_{i=1}^m W_k(f_i) \cos[\varphi(f_i, t)], \quad (3)$$

значения которых вычисляются по результатам многократного фазочастотного прослеживания волн на трассе при различных частотных параметрах весовых функций $W_k(f_i)$. При этом индекс k определяет номер весовой функции.

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

$$W_k(f_i) = \begin{cases} 0, & f_i \leq f_n, f_i > f_b; \\ \frac{2}{f_c} (f_i - f_n), & f_n < f_i \leq f_c; \\ -\frac{1}{f_c} (f_i - f_b), & f_c < f_i \leq f_b, \end{cases}$$

где f_c – частота максимума весовой функции $W_k(f)$; f_n, f_b – соответственно нижняя и верхняя частоты весовой функции.

Вид треугольной весовой функции (фильтра) представлен на рис. 2.

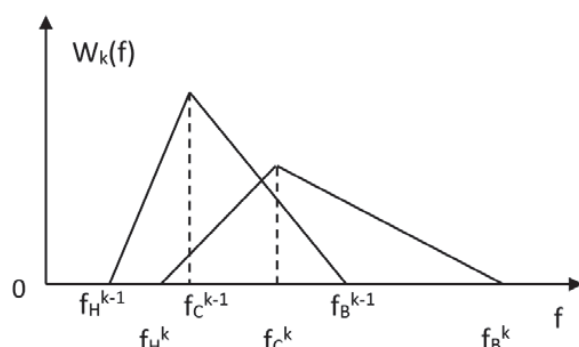


Рис. 2. Вид треугольной весовой функции

Fig. 2. Triangular weighting function

Параметры $W_k(f)$ при ФАН-анализе в выражении (3) изменяются так, чтобы центральная частота весовой функции удовлетворяла следующему соотношению:

$$f_c^k = \frac{f_n^m - f_n^1}{(m-1)^p} (k-1)^p + f_c^1,$$

где m – количество весовых функций; f_c^m – центральная частота последней функции; f_c^1 – центральная частота первой функции; p – выбранный параметр крутизны.

Совокупность функций качества вида (3) образует ФАН-колонку (ФАН-образ) в координатах t, f_c для каждой анализируемой сеймотрассы, а совокупность ФАН-образов для набора сеймотрасс, полученных в различных точках наблюдения, образует ФАН-разрез (разрез ФАН-Г). Различия в таких важных свойствах анализируемых толщ, как слоистость, акустическая жесткость, поглощение, мощность, пористость, проницаемость, отражаются в ее ФАН-образе. При этом ФАН-образы, которые определяются закономерностями распределе-

ния амплитуд функций качества ФЧП в координатах частота–время, будут различаться рисунком записи, т. е. протяженностью, интенсивностью, взаимным расположением и наклоном выделяемых осей синфазности в заданном частотном диапазоне. Такая чувствительность ФАН-образов к изменению структурных и петрофизических свойств среды позволяет использовать их как основу для построения методики прогноза типа геологического разреза.

Алгоритм прогноза типов геологического разреза

На основе ФАН-анализа был разработан алгоритм прогноза типов геологического разреза, структурная схема которого приведена на рис. 3. Предварительно для реализации алгоритма в процессе обработки сейсмических материалов определяют ФАН-образы в точках расположения скважин в заданном интервале глубин. На основе имеющейся информации о геофизическом исследовании скважин (ГИС) и результатов их испытаний выделенные ФАН-образы классифицируют по типам геологического разреза и рассматривают при прогнозе как эталонные. Далее для различных точек наблюдения в около-межскважинном пространстве находят 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 разреза в около-межскважинном пространстве.



Рис. 3. Обобщенная схема алгоритма прогноза типа геологического разреза

Fig. 3. Generalized scheme of prediction algorithm for the type of geological section

В предложенном алгоритме прогноза для выделения вектора информативных признаков при

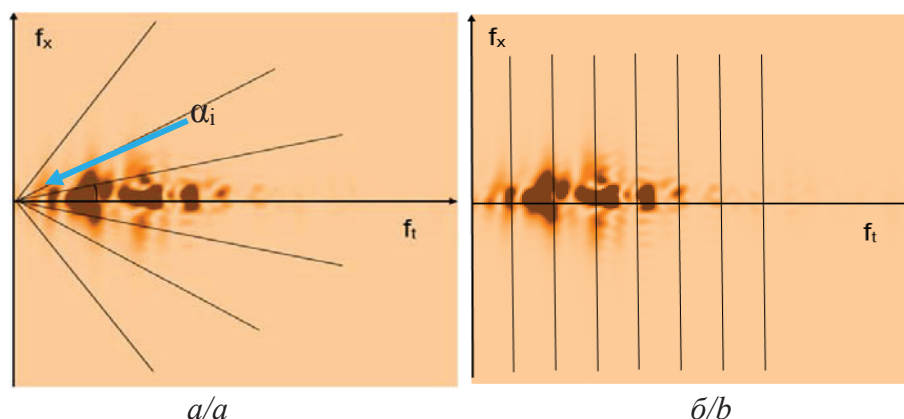


Рис. 4. Секторная (а) и полосовая (б) маски

Fig. 4. Sector (a) and striped (b) masks

проведении автоматической классификации определяется двумерный энергетический спектр формированных изображений ФАН-образов. Информативные вектора, соответствующие различным ФАН-образам, находятся из спектров изображений с помощью специально синтезированных масок, которые разбивают Фурье-плоскость на L областей. Если обозначать через s_i элемент Фурье-плоскости, соответствующей i -й области разбиения, то i -я составляющая вектора признаков будет иметь вид:

$$x_i = \frac{s_i}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(f_t, f_x)|^2 \cdot df_t \cdot df_x},$$

где $i=0 \div L-1$.

В результате анализа структуры двумерных спектров ФАН-образов было синтезировано две маски: секторная и полосовая (рис. 4).

Секторная маска использовалась для отбора информации о распределении нормированной энергии по углу α , полосовая – для отбора информации о распределении нормированной энергии по временной частоте f_t . В качестве дополнительных информативных параметров были введены значения временной мощности анализируемых толщ в заданной полосе частот.

Результаты экспериментов

Исследование предложенного алгоритма прогноза проводилось на моделях слоистых поглощающих сред, обладающих различным коллекторам. Обобщенная структура принятых моделей среды и петрофизические параметры отдельных слоев: скорость распространения продольной волны V , плотность пород ρ , параметр поглощения β , мощность слоя h , приведены в табл. 1.

В зависимости от свойств продуктивной толщи (слоя песчаника) различали четыре типа разреза. В первом случае песчаный слой предполагался на-

сыщенным газом, во втором – нефтью, в третьем – водой. В четвертом случае в модели имитировалось наличие непроницаемого карбонизированного песчаника. В зависимости от типа разреза петрофизические параметры продуктивной толщи выбирались исходя из обобщенных данных, характерных для верхнеюрской продуктивной толщи Крапивинского нефтяного месторождения [18]. В табл. 2 приведены пределы изменения значений петрофизических параметров продуктивной толщи Крапивинского нефтяного месторождения, задаваемые при проведении экспериментов.

Таблица 1. Структура среды и петрофизические параметры ее слоев

Table 1. Structure of the environment and petrophysical parameters of its layers

	V , м/с (m/s)	ρ , г/см ³ (g/cm ³)	β , с/м (s/m)	h , м (m)
Верхний слой/Upper layer	2500	2,50	0,00002	200
Аргиллиты/Argillite	2700	2,50	0,000015	20
Продуктивная толща/Productive strata				20
Аргиллиты/Argillite	3000	2,55	0,000015	10
	3100	2,60	0,000014	10
	3200	2,65	0,000013	10
	3100	2,55	0,000014	10
	3000	2,50	0,000015	10
Нижний слой/Bottom layer	3000	2,60	0,000015	200

Как показал анализ, указанные в табл. 2 значения параметров достаточно хорошо согласуются с петрофизическими характеристиками верхнеюрской продуктивной толщи и ряда других месторождений Томского приобья. Мощность первого слоя в принятых моделях среды задана условно и не привязана к глубине залегания продуктивной толщи, так как ставилась основная задача исследования классификации типов разреза, обладающих различными коллекторскими свойствами применительно к условиям основного продуктивного горизонта.

Таблица 2. Пределы изменения петрофизических параметров продуктивной толщи

Table 2. Limits of change in the petrophysical parameters of the productive strata

Тип продуктивной толщи Type of productive strata	V , м/с (m/s)	ρ , г/см ³ (g/cm ³)	β , с/м (s/m)
Газонасыщенный песчаник Gas-saturated sandstone	2400–3100	2,02–2,72	0,0001–0,0005
Нефтенасыщенный песчаник Oil-saturated sandstone	2822–3420	2,02–2,72	0,000045–0,0001
Водонасыщенный песчаник Water-saturated sandstone	3400–3800	2,32–2,77	0,000003–0,00005
Карбонизированный песчаник Carbonized sandstone	4200–5800	2,4–2,8	0,00001–0,00002

Формирование волновых полей, соответствующих заданной модели среды, осуществлялось на ЭВМ с помощью специально разработанной программы. В качестве примера на рис. 5 показаны

фрагменты сформированных волновых полей для указанных выше моделей сред, соответствующих различным типам разреза. На рис. 6 представлены определенные в этом случае ФАН-образы для указанных типов разреза. Из рис. 6 видно, что для различных типов разреза ФАН-образы значительно различаются интенсивностью, протяженностью, взаимным расположением и наклоном выделяемых на их изображениях осей синфазности.

Указанные различия находят отражение в вычисляемых при прогнозе указанных выше векторах информативных параметров E_a и E_f (рис. 7).

Для проведения классификации выделенных информативных векторов признаков ФАН-образов применялись методы кластерного анализа и искусственных нейронных сетей [19, 20]. Из известных методов кластерного анализа был выбран метод k -средних, который широко используется на практике для решения различных задач. Для оценки надежности классификации различных типов разрезов задавались для каждого типа по 20 вариантов значений петрофизических параметров продуктивной толщи. Результаты исследования на моделях показали, что алгоритм, основанный на нейронных сетях, достаточно надежно классифицирует различные типы геологического разреза – вероятность правильной классификации состави-

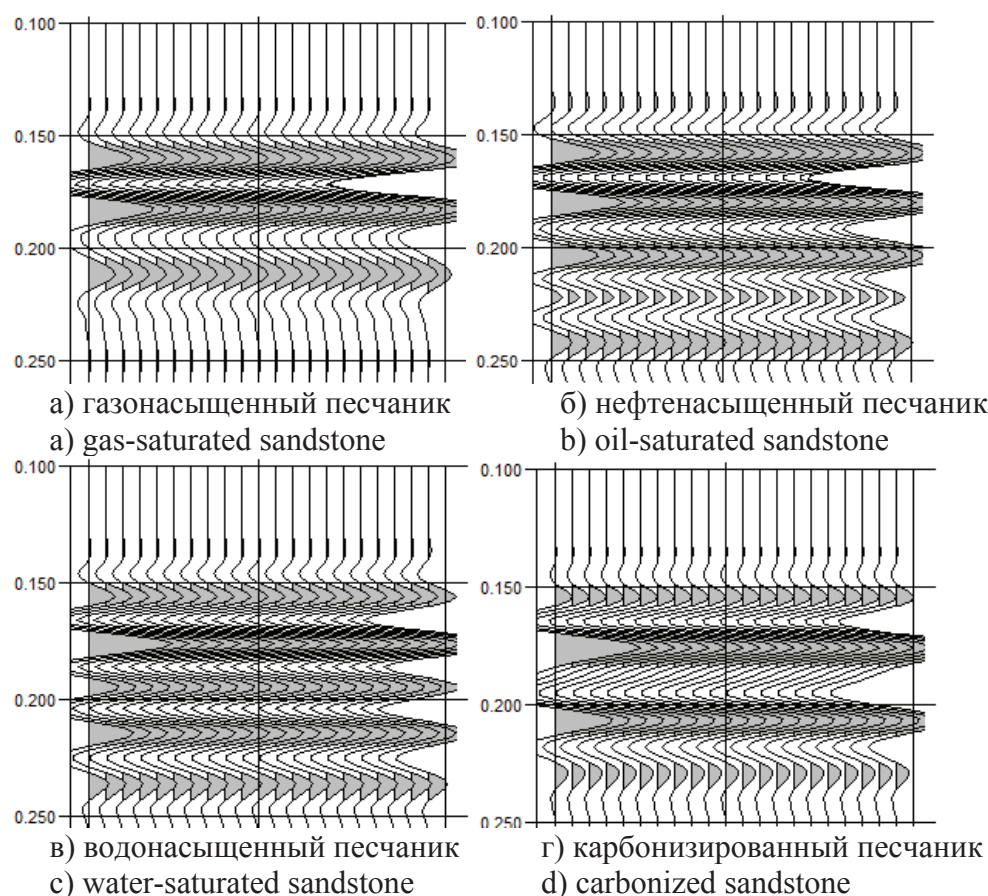


Рис. 5. Фрагменты волновых полей

Fig. 5. Fragments of wave fields

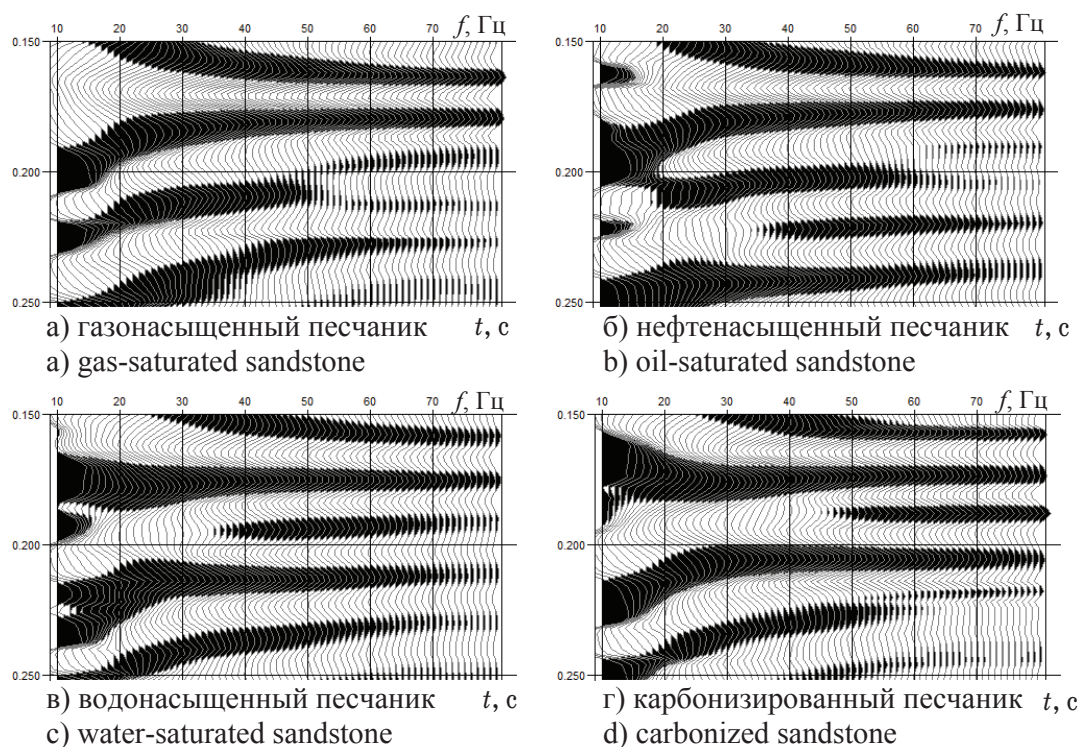


Рис. 6. ФАН-образы различных типов геологического разреза

Fig. 6. PTA-images of different types of geological section

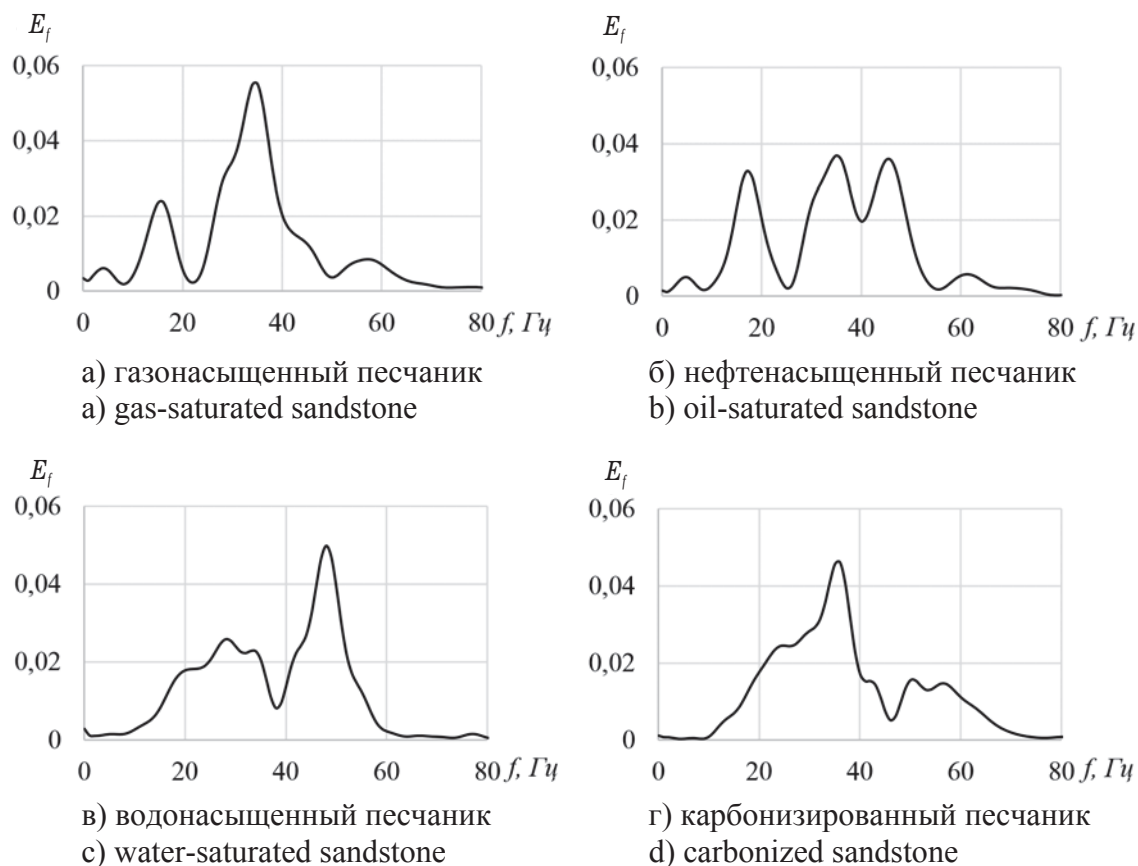


Рис. 7. Вектор признака E_f для различных типов геологического разреза

Fig. 7. Feature vector for different types of geological section

ла 88 %. Дискриминационная способность метода к-средних была несколько ниже, чем у нейронных сетей. Вероятность принятия правильного решения в этом случае составила 86,3 %.

С целью исследования устойчивости метода прогноза типов геологического разреза на основе ФАН-анализа было рассмотрено влияние нерегулярных помех на результаты классификации. При этом нерегулярная помеха формировалась в виде некоррелированного гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием, среднеквадратическое отклонение которого задавалось исходя из

требуемого отношения сигнала к шуму: $\delta = \frac{A}{\sigma_{\xi}}$.

Эксперимент проводился путем статистического моделирования на ЭВМ, при котором для каждого задаваемого отношения сигнала к шуму объем выборки составлял 50 наблюдений. Рассматривались значения отношения сигнала к шуму, которые, как правило, обеспечиваются после проведения стандартных процедур обработки волновых сейсмических полей. Исследования показали, что предлагаемый алгоритм прогноза обладает достаточно высокой помехоустойчивостью. Так, для отношения сигнала к шуму $\delta=5$ при доверительной вероятности 0,95 вероятность правильной классификации типов разреза при использовании нейронных сетей составила 0,81.

Обработка и интерпретация реальных данных

Опробование предложенного алгоритма прогноза типов геологического разреза проводилось на материалах метода общей глубинной точки (ОГТ), полученных на ряде месторождений нефти Томского приобья. Алгоритм прогноза также применялся при обработке данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП), зарегистрированных при исследовании 9 разведочных скважин [21].

В качестве примера кратко рассмотрим последние результаты обработки материалов ОГТ, полученные при проведении площадных наблюдений (3D сейсморазведка) на Конторовичском нефтяном месторождении. Основным продуктивным горизонтом на данном месторождении являются отложения верхней Юры, характеризующиеся тонкослоистой структурой. В связи с этим рассматривалась толща, ограниченная подошвой Баженовской свиты и кровлей Тюменской свиты. Исходными материалами для обработки служили разрезы ОГТ, полученные для вертикальных сечений временного куба 3D. С целью повышения надежности выделения отражающих границ в области анализируемой продуктивной толщи по данным временных разрезов ОГТ предварительно были построены объектно-ориентированные разрезы по данным ФЧП. На рис. 8 показаны фрагменты разреза ОГТ и полученного разреза ФЧП для одного из сечений куба 3D. Сопоставление временных разрезов ОГТ и объектно-ориентированных фазовых разрезов (рис. 8) показало, что применение ФЧП значительно улучшает разрешение волн в области их интерференции, а также позволяет выделять и проследить слабые по интенсивности отраженные волны. Полученные количественные оценки отношения сигнал/шум показали, что сигнал (отражения от целевых горизонтов) на разрезах ФЧП по амплитуде выше уровня шума в 8–10 раз, что является, как известно, вполне приемлемым для решения структурных задач.

На объектно-ориентированных разрезах (разрезы ФЧП, рис. 8, б) по сравнению с разрезами ОГТ (рис. 8, а) более отчетливо проявляются различные неоднородности исследуемого геологического разреза.

Построенные разрезы ФЧП позволили уточнить временной интервал для проведения ФАН-анализа в области продуктивной толщи. По результатам ГИС и испытаниям пробуренных на ме-

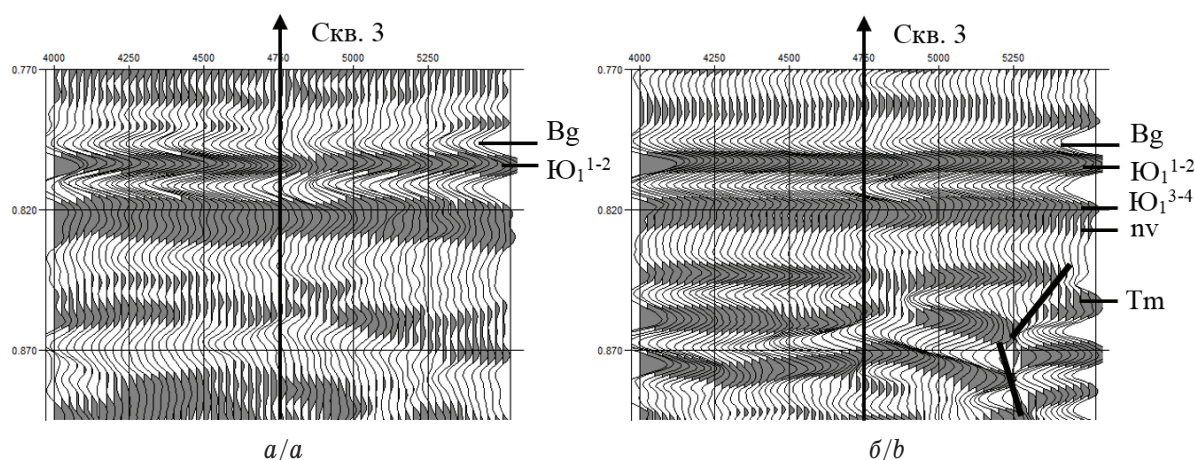


Рис. 8. Фрагменты разрезов ОГТ (а) и ФЧП (б); — тектоническое нарушение

Fig. 8. Fragments of sections of CDP (a) and PFC (b); — tectonic disturbance

Таблица 3. Полученные характеристики ГИС и результаты испытания скважин для пласта Ю₁

Table 3. Received characteristics of well logging and well test results for the strata Yu₁

Номер скважин Number of a well	Пласты Strata	Эффек- тивная толщина, м Effective thickness, m	Коэффи- циент пористо- сти, % Porosity coefficient of, %	Коэффи- циент про- ницаемо- сти, мД Permeability coefficient, mD	Дебит скважины, м³/с Well debit, m³/s
1	Ю ₁ ¹ (Yu ₁ ¹)	2,8	10,2	2,6	Нефть (Oil) 0,67
	Ю ₁ ² (Yu ₁ ²)	6,8	12,1	9,97	
2	Ю ₁ ¹ (Yu ₁ ¹)	2,8	15,0	2,85	Вода (Water) 5,8
	Ю ₁ ² (Yu ₁ ²)	2,6	15,3	6,48	Не испытана (Not tested)
3	Ю ₁ ¹ (Yu ₁ ¹)	1,9	14,6	2,93	Нефть (Oil) 16,2
	Ю ₁ ² (Yu ₁ ²)	5,1	15,0	4,58	Нефть (Oil) 15,0
4	Ю ₁ ¹ (Yu ₁ ¹)	2,8	15,9	9,93	Нефть (Oil) 4,6
	Ю ₁ ² (Yu ₁ ²)	2,5	15,4	13,96	
5	Ю ₁ ¹ (Yu ₁ ¹)	2,4	14,3	2,39	Нефть (Oil) 9,3
	Ю ₁ ² (Yu ₁ ²)	5,4	16,7	16,0	
6	Ю ₁ ¹ (Yu ₁ ¹)	2,4	14,6	2,75	Нефть (Oil) 10,67
	Ю ₁ ² (Yu ₁ ²)	5,0	13,8	1,69	

сторождении разведочных скважин (табл. 3) были выделены шесть типов геологического разреза, различающихся эффективными толщинами, по-

ристостью, проницаемостью и дебитом пластовых флюидов.

Для сейсмотрасс, соответствующих положениям скважин, были определены ФАН-образы и рассчитаны для них отмеченные выше информативные параметры. Проведенный анализ полученных ФАН-образов (рис. 9) показал, что они имеют значимые различия, что позволяет их использовать в качестве эталонных при классификации типов разрезов в межскважинном пространстве.

Далее для суммотрасс, зарегистрированных на различных пикетах наблюдения межскважинного пространства, были получены ФАН-образы и построены разрезы ФАН-Г (рис. 10).

В соответствии с вышерассмотренной методикой прогноза осуществлялась классификация полученных ФАН-образов и картирование выделенных типов разрезов по анализируемой площади. Для автоматической классификации типов разреза использовался алгоритм, основанный на нейронных сетях. Комплексная интерпретация полученных результатов прогноза с привлечением структурных построений и геологических материалов позволила выделить распространение продуктивных типов разреза и дать рекомендации по бурению эксплуатационных скважин. Следует отметить, что на Конторовичском месторождении ранее уже были пробурены 5 эксплуатационных скважин, данные о которых не были использованы при проведении прогноза. Проведенный анализ показал, что расположение четырех из пяти сква-

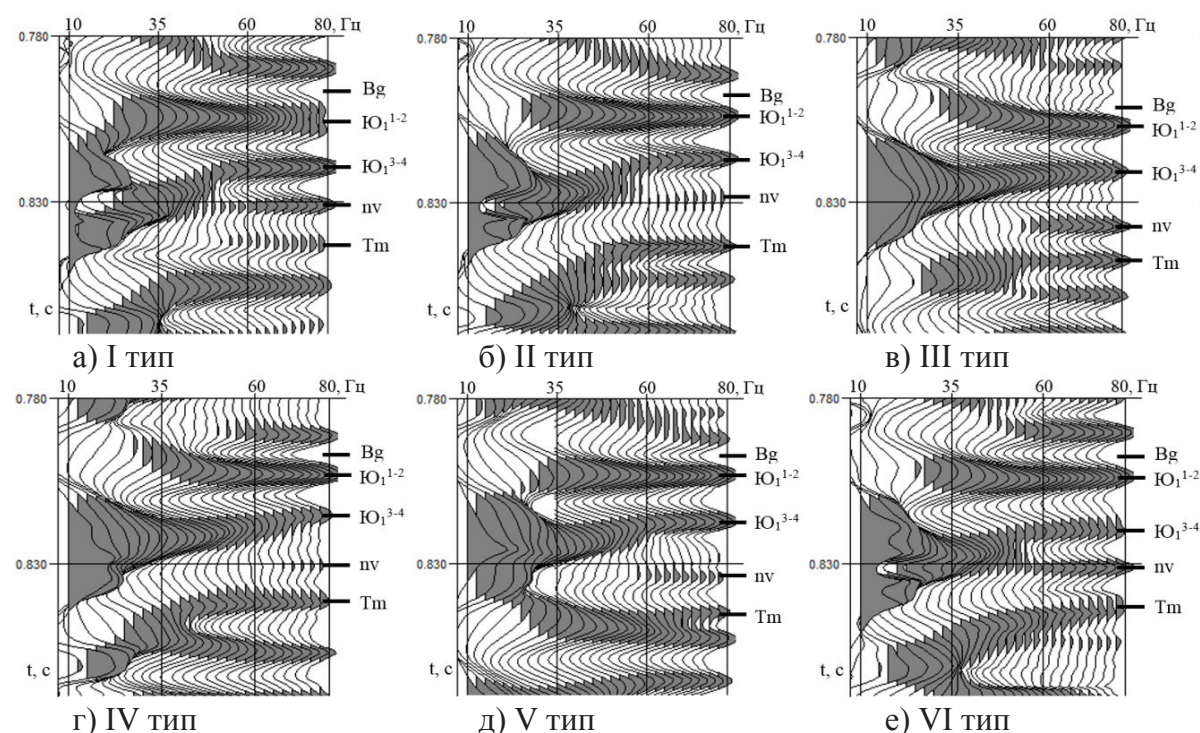


Рис. 9. Эталонные ФАН-образы

Fig. 9. Reference FTA-images

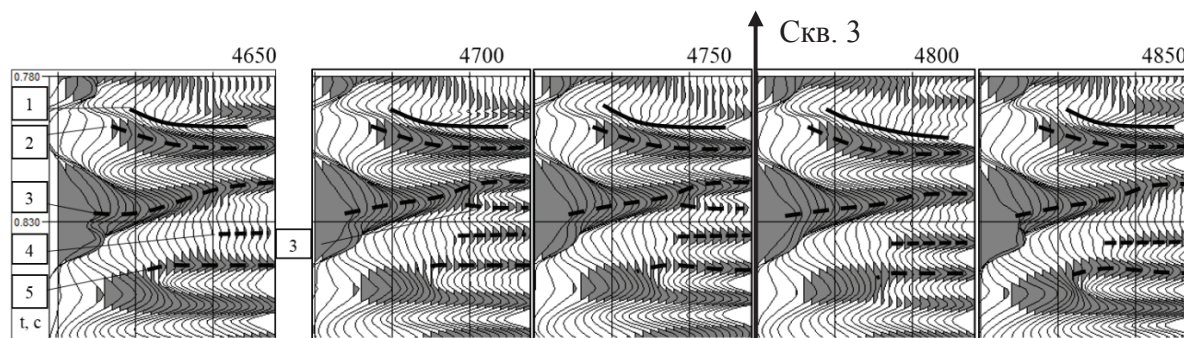


Рис. 10. Фрагмент разреза ФАН-Г: 1 – подошва баженовской свиты (Bg); 2 – пласт $Ю_1^{1-2}$ васюганской свиты; 3 – пласт $Ю_1^{3-4}$ васюганской свиты; 4 – нижневасюганская подсвита (nv); 5 – кровля тюменской свиты (Tm)

Fig. 10. Fragments of section PTA-G. 1 is the sole of the Bazhenov suite (Bg); 2 is the stratum Yu_1^{1-2} of the Vasyugan suite; 3 is the stratum Yu_1^{3-4} of the Vasyugan suite; 4 is the lower Vasyugan subsuite (nv); 5 is the roof of the Tyumen suite (Tm)

жин хорошо согласуется с прогнозными зонами распространения продуктивных типов разреза, построенными по предложенному алгоритму, что в определенной степени свидетельствует об эффективности его применения. Также, как уже отмечалось выше, предлагаемый метод прогноза ранее использовался при выборочной обработке данных на ряде других месторождений (Крапивинское, Болтное, Междуреченское) Томского приобья. По результатам обработки были выделены нефтеперспективные зоны, нашедшие подтверждение в результате последующего бурения скважин.

Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм прогноза успешно прошел апробацию на модельных и реальных материалах и был включен в состав программно-алгоритмических комплексов «Геосейф» и «Геосейф-ВСП», предназначенных для детальной обработки данных наземной и скважинной сейсморазведки. Обработка материалов ОГТ подтвердила перспективность применения фазовременного анализа для прогноза типов геологического разреза в межскважинном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов Д.Н. Детальный прогноз геологического разреза в сейсморазведке. – М.: Недра, 2007. – 195 с.
2. Немова В.Д., Бордюг М.А., Ревяко А.В. Сейсмогеологическое моделирование изменений свойств отложений баженовской свиты в межскважинном пространстве // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 2. – С. 72–97.
3. Давыдова Е.А. Технология спектрально-временного прогнозирования типов геологического разреза по данным сейсморазведки, бурения и ГИС: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 206 с.
4. Istekova S.A., Umirova G.K. Characteristics of Seismic Data Used to Study the Reservoir of South Torgay Oil and Gas Basin // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2014. – V. 3. – Iss. 11. – P. 17382–17394.
5. Самаркин М.А. Теоретическое и модельное обоснование методики определения типов геологического разреза переменной толщины в межскважинном пространстве // Журнал Геофизика. – 2003. – Специальный выпуск. – С. 85–89.
6. Новая методика регионального прогноза высокопродуктивных баженовских коллекторов Западной Сибири / Е.А. Копилевич, М.Б. Скворцов, Н.Д. Сурова, Г.В. Кузнецов // Геология нефти и газа. – 2016. – № 4. – С. 58–63.
7. Мушин И.А., Лисунова О.В., Копилевич Е.А. Методики спектрально-временного прогнозирования типов геологического разреза // Геофизика. – 2008. – № 3. – С. 22–27.
8. Худзинский Л.А. Об определении некоторых параметров однородных слоев по их фазовым спектральным характеристикам // Изв. АН СССР. Физика земли. – 1996. – № 5. – С. 68–77.
9. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2016. – V. 54. – P. 3200–3207.
10. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis / V.P. Ivanchenkov, O.N. Vylegzhanin, O.V. Orlov, A.I. Kochegurov // Proc. 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS-2005. – Novosibirsk, 2005. – V. 1. – P. 159–162.
11. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium processing // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – V. 342. – P. 27–36.
12. Bibi C. Aritman. Repeatability study of seismic source signatures // Geophysics. – 2001. – V. 66. – № 6. – P. 1811–1817.
13. Schimmel M., Paulssen H. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks // Geophys. J. Int. – 1997. – V. 130. – P. 497–505.
14. Gelchinsky B., Landa E., Shtivelman V. Algorithms of phase and group correlation // Geophysics. – 1985. – V. 50. – P. 596–608.
15. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Нгуен Суан Хунг. Прогноз коллекторских свойств пород на основе взаимных фазовых спектров отраженных сейсмических волн // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 5. – С. 24–28.
16. Авербух А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. – М.: Недра, 1982. – 232 с.
17. Авербух А.Г., Трапезникова Н.А. Отражение и преломление плоских волн при нормальном падении на границу поглощающих сред // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1972. – № 9. – С. 74–83.
18. Разин А.В. Методика детального определения акустических и коллекторных свойств горных пород по данным сейсморазведки

- ки: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1999. – 175 с.
19. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. – М.: Статистика, 1977. – 185 с.
20. Haykin S. Neural Networks: a Comprehensive Foundation. 3rd Edition. – Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 2007. – 906 p.
21. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения околоскважинного пространства // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 58–63.

Поступила 21.03.2017 г.

Информация об авторах

Иванченков В.П., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кочегуров А.И., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Нгуен Суан Хунг, аспирант кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Орлов О.В., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.834

PREDICTING GEOLOGICAL SECTION TYPES BASED ON THE PHASE-TEMPORAL ANALYSIS OF SEISMIC OBSERVATIONS DATA

Viktor P. Ivanchenkov¹,

kaicc@tpu.ru

Alexander I. Kochegurov¹,

kaicc@tpu.ru

Nguyen Xuan Hung¹,

hungnx@tpu.ru

Oleg V. Orlov¹,

orloff.oleg@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study. Currently, to solve the geological section prediction problems, including the prediction of sedimentation mass of oil and gas potential, based on the seismic observations data, the dynamic characteristics of reflected waves, directly related to their amplitude and energy, are widely used as diagnostic features. Until recently, the information on the phase-frequency characteristic properties was used little if at all. Meanwhile, the seismic response phase, in particular a complex pattern of change of their phase spectra, contains information on location of reflecting boundaries of the analyzed rock mass, the absorbing and dispersion properties of the bedded absorptive structure. Therefore, phase-frequency characteristics of reflected waves can serve as important diagnostic features for predicting sedimentation mass of oil and gas potential.

The aim of the study is to develop algorithm for predicting and mapping the geological section types based on the phase-temporal analysis of the seismic records; to explore the reliability of the algorithm on the models of geological structures and test its application to processing and interpreting the data from the common depth point method at the Kontorovichsky oil field.

The methods used in the study: the digital processing of spatiotemporal signals and field, methods of discrete Fourier transform, mathematical modeling and computer experiment.

The results. The authors showed the possibility of extracting useful information from the phase-frequency characteristics of seismic signals for diagnostic features formation at geological section prediction. Based on the selected features, the method of phase-temporal seismic records analysis was developed and the algorithm for forecasting and mapping the geological section types was built. The developed algorithm was studied on the models of bedded absorptive structure, experimental processing and interpreting real data. The results obtained confirmed the prospects of applying phase-temporal analysis for predict the geological section types in inter-well space.

Key words:

Forecast of types of a geological section, method of the phase-temporal analysis, algorithms of phase-frequency tracing of seismic waves, interborehole space.

REFERENCES

1. Krylov D.N. *Detalny prognoz geologicheskogo razreza v seysmorazvedke* [Detailed forecast of a geological section in seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 195 p.
2. Nemova V.D., Bordyug M.A., Revyako A.V. Seismogeological modeling of changes of properties of the Bazhenov shale deposits in interborehole space. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2013, vol. 2, pp. 72–97. In Rus.
3. Davydova E.A. *Tekhnologiya spektralno-vremennogo prognozirovaniya tipov geologicheskogo razreza po dannym seysmorazvedki, bureniya i GIS*. Dis. Dokt. nauk [Technology of spectral and time forecasting of types of a geological section according to seismic exploration, drilling and GIS. Dr. Diss.]. Moscow, 2004. 206 p.
4. Istekova S.A., Umirova G.K. Characteristics of Seismic Data Used to Study the Reservoir of South Torgay Oil and Gas Basin. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2014, vol. 3, Iss. 11, pp. 17382–17394.
5. Samarkin M.A. Theoretical and model reasons for a technique of determining the types of geological section with different thickness in interborehole space. *Zhurnal geofizika*, 2003, Special Issue, pp. 85–89. In Rus.
6. Kopilevich E.A., Skvortsov M.B., Surova N.D., Kuznetsov G.V. New technique of regional forecast of highly productive Bazhenov collectors in Western Siberia. *Geologiya nefti i gaza*, 2016, no. 4, pp. 58–63. In Rus.
7. Mushin I.A., Lisunova O.V., Kopilevich E.A. Techniques of spectral and time forecasting of types of geological section. *Geofizika*, 2008, no. 3, pp. 22–27. In Rus.
8. Khudzinskiy L.A. Ob opredelenii nekotorykh parametrov odnorodnykh sloev po ikh fazovym spektralnym kharakteristikam [On determination of certain parameters of uniform layers by their phase spectral characteristics]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1996, no. 5, pp. 68–77.
9. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2016, vol. 54, pp. 3200–3207.
10. Ivanchenkov V.P., Vylegzhanin O.N., Orlov O.V., Kochegurov A.I. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis. *Proc. 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS-2005*. Novosibirsk, 2005, vol. 1, pp. 159–162.
11. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Kupina N.A. Detection accuracy of the temporary state of complex signals using phase-frequency tracking methods with equilibrium and non-equilibrium

- um processing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, vol. 342, pp. 27–36.
12. Bibi C. Aritman. Repeatability study of seismic source signatures. *Geophysics*, 2001, vol. 66, no. 6, pp. 1811–1817.
13. Schimmel M., Paulssen H. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks. *Geophys. J. Int.*, 1997, 130, pp. 497–505.
14. Gelchinsky B., Landa E., Shtivelman V. Algorithms of phase and group correlation. *Geophysics*, 1985, vol. 50, pp. 596–608.
15. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Nguyen X.H. Prediction of reservoir properties of rocks based on mutual phase spectrums of reflected seismic waves. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 5, pp. 24–28. In Rus.
16. Averbukh A.G. *Izucheniye sostava i svoystv gornyykh porod pri seysmorazvedke* [Studying structure and properties of rocks at seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 232 p.
17. Averbukh A.G., Trapeznikova N.A. Otrazheniye i prelomleniye ploskikh voln pri normalnom padenii na granitsu pogloshchayushchikh sred [Reflection and refraction of flat waves at normal falling on border of the absorbing environments]. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1972, no. 9, pp. 74–83.
18. Razin A.V. *Metodika detal'nogo opredeleniya akusticheskikh i kolektornykh svoystv gornyykh porod po dannym seysmorazvedki*. Dis. Kand. nauk [Technique of detailed definition of acoustic and collector properties of rocks according to seismic exploration. Cand. Diss.]. Tomsk, 1999. 175 p.
19. Dyuran B., Odell P. *Klasterny analiz* [Cluster analysis]. Moscow, Statistika Publ., 1977. 185 p.
20. *Simon Haykin, Neural Networks: Prentice-Hall Inc. Comprehensive Foundation* (3rd Edition). Upper Saddle River, NJ, 2007. 906 p.
21. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. Methods of phase-frequency analysis of seismic waves and their application in studying borehole environment. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, no. 10, pp. 58–63. In Rus.

Received: 21 March 2017.

Information about the authors

Viktor P. Ivanchenkov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander I. Kochegurov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nguyen Xuan Hung, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg V. Orlov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.