

УДК 550.834

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ ПРОГНОЗА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Кочегуров Александр Иванович¹,
kaicc@tpu.ru

Кочегурова Елена Алексеевна¹,
kocheg@mail.ru

Орлов Олег Викторович¹,
orloff234@gmail.ru

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

Актуальность. Одними из основных задач при прогнозировании геологического разреза являются задачи определения типа разреза и картирование типов по изучаемой площади, а также оценки поглощающих и дисперсионных свойств геологических сред. Для решения данных задач в настоящее время широко применяются специализированные программно-алгоритмические комплексы обработки и интерпретации сейсмических материалов. В большинстве современных комплексов для прогноза геологического разреза используется информация, извлекаемая из кинематических и динамических характеристик сейсмических волн. На основе полученной информации и данных о геофизическом исследовании скважин формируются представления о вещественном составе осадков, наличии продуктивных толщ на исследуемой площади. Такой подход позволил в ряде регионов России, в том числе в Западной Сибири, получить интересные и важные результаты, связанные с обнаружением продуктивных осадочных толщ и оценкой их нефтегазоносности, что было подтверждено практикой. В тоже время результаты практической деятельности показали, что при проведении исследований многих площадей присутствуют области, где процент выделения ложных аномалий геологических сред и принятия ошибочных решений при прогнозе еще достаточно велик. Это связано в том числе с тем, что при анализе регистрируемого сейсмического поля для прогноза геологического разреза используются в основном энергетические характеристики отраженных волн, а изменения фазовых спектров практически не учитываются. Таким образом, комплексное использование характеристик отраженных сейсмических волн (амплитудных и фазовых) при прогнозе геологического разреза является весьма актуальной задачей.

Цель: на основе метода фазочастотной деконволюции провести фазоэнергетический анализ для различных моделей сейсмических полей для прогноза геологического разреза.

Методы: вычислительный эксперимент, обратная фильтрация, дискретное преобразование Фурье.

Результаты. Разработан алгоритм фазоэнергетического анализа сейсмических волн, в основу которого положены результаты фазочастотной деконволюции. Проведены исследования алгоритма на различных моделях геологических сред, построены фазоэнергетические разрезы, позволяющие выделять зоны с аномально низкими значениями энергии для последующей диагностики нефтегазоносности. Приведен пример построения фазоэнергетического разреза по реальным данным в интервале верхнеюрских отложений.

Ключевые слова:

прогноз геологического разреза, фазочастотная деконволюция, фазоэнергетический анализ, обратный фильтр сжатия, модели геологических сред.

Введение

Современный этап поиска нефти и газа требует проведения полного цикла разведочных работ в слабо исследованных территориях. При этом даже в тех районах, где расположены промышленные месторождения, а также на площади самих месторождений, еще весьма актуальна задача, связанная с построением пространственной модели природных нефтяных резервуаров. Особенно интересны модели резервуаров с латеральными изменениями фильтрационно-емкостных свойств геологической среды. Решение таких задач в том числе связано с построением цифровых двойников нефтяных месторождений на основе применения эффективных методов прогнозирования геологического разреза (ПГР).

В общем случае все методы ПГР в зависимости от цели решаемых задач условно можно разделить на две группы: методы, направленные на детальное раз-

деление слоистых толщ для изучения структуры геологического разреза, и методы, используемые для определения петрофизических параметров осадочных толщ, прогноза на их основе расположения и нефтегазоносности коллекторов. Для детального разделения слоистых толщ в настоящее время широко используются методы деконволюции. Особенно эти методы необходимы при изучении тонкослоистых геологических сред. В таких средах из-за малой мощности слоев (20–30 м) отраженные волны создают интерференционную картину, и выделить границы отдельных отражений на сейсмическом разрезе становится невозможно. Еще более усложняется ситуация из-за наличия нерегулярных помех, образующих аддитивное шумовое поле. Поэтому при исследовании тонкослоистых сред для получения разрезов с высоким разрешением предложено большое количество алгоритмов сжатия сигналов, основанных на методах деконволюции [1–10].

В целом деконволюция является необходимой составляющей любого графа обработки сейсмических данных и направлена на увеличение временного разрешения сигналов путем сжатия сейсмического импульса. Результаты деконволюции существенно образом влияют на возможность корреляции отраженных волн и качество дальнейших глубинных построений, включая прогноз геологического разреза. С точки зрения математики деконволюция является операцией обратной фильтрации свертки сигнала с импульсной последовательностью. Здесь для синтеза частотной характеристики обратного фильтра требуется знать полный комплексный спектр сигнала [11]. Однако в современных программно-алгоритмических комплексах обработки сейсмической информации таких мировых лидеров, как ЦГЭ в России, Schlumberger в США и др., используются алгоритмы деконволюции (слепая, импульсная, предсказывающая деконволюция и т. д.), основанные на анализе амплитудно-частотных характеристик отраженных волн. В отношении фазовых спектров принимается предположение, что они являются нуль-фазовыми или минимально фазовыми функциями [12–16]. К сожалению, есть только несколько работ, где авторы используют фазовые соотношения при синтезе обратных фильтров. Однако даже здесь в качестве фаз используют числовые константы, рассчитанные ранее по большому объему экспериментальных данных [17].

В то же время существует очень интересный подход, связанный с применением статистического алгоритма корректировки фазового спектра, предложенный и достаточно хорошо формализованный группой ученых (Д.Б. Фиников и др.) и получивший название «фазовая деконволюция». Суть данного подхода заключается в приведении сигнала к нуль-фазовому виду без изменения его амплитудного спектра [18]. Разработанный алгоритм фазовой деконволюции прошел достаточную апробацию на реальных данных, показал хорошие результаты на ряде площадей и применяется в настоящее время в практике обработки и интерпретации сейсмических данных. Однако и данный подход имеет ряд минусов. Так, для его реализации требуется проводить весьма непростую процедуру цифровой фильтрации – применение симметризирующих фильтров, кроме того, в ряде случаев возникает неопределенность в постоянной составляющей фазового спектра, которая может быть скорректирована только с учётом скважинных данных, и то не всегда. Поэтому далеко не всегда методы деконволюции дают возможность с необходимой точностью проследить границы отражения, так как за счет поглощения и дисперсии геологической среды форма отраженных волн претерпевает изменения, что естественно приводит к изменению спектра сигналов и требует формирования новой частотной характеристики фильтра сжатия. Для построения частотной характеристики фильтра сжатия в поглощающих средах целесообразно наряду с энергетическими спектрами сейсмических сигналов использовать и их фазовые спектры, стационарная область которых несет информацию о местоположении отражающих границ. Таким образом, комплексное использование ампли-

тудных и фазовых составляющих спектра отраженных волн в фильтрах сжатия (фазочастотная деконволюция) имеет большие перспективы, а сами методы фазочастотной деконволюции лежат в основе проведения фазоэнергетического анализа, который позволяет увеличить достоверность ПГР.

Постановка задачи

Многочисленные исследования на моделях и анализ реальных сейсмических разрезов общей глубинной точки (ОГТ) для сред с известным флюидонасыщением показали, что достаточно часто фазовые спектры коэффициента отражения от подошвы или кровли вмещающей толщи $\varphi_k(f)$ существенно зависят от наличия или отсутствия углеводородов в данной толще. Так, например, фазочастотные характеристики волн, отраженных от кровли или подошвы продуктивной толщи, имеют следующие особенности [19]:

- в случае отсутствия углеводородов в продуктивной толще фазочастотная характеристика в области несущей частоты сигнала $\varphi_k(f_0)$ близка к величине $0+2\pi k$, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$
- в случае присутствия углеводородов в продуктивной толще $\varphi_k(f_0) \approx \pi/2 + 2\pi k$, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$
- в случае водонасыщенной песчаной толщи величина $\varphi_k(f_0)$ занимает промежуточное положение ($0 < \varphi_k(f_0) \bmod 2\pi k < \pi/2$).

Обратимся теперь к методу фазочастотной деконволюции, рассмотренному подробно в [20], функция качества которого формируется взвешенной суммой значений косинусов мгновенных фазовых спектров. Тогда, исходя из выделенных особенностей фазочастотной характеристики (ФЧХ) продуктивной толщи, приведенных выше, можно констатировать:

- в случае отсутствия углеводородов в продуктивной толще величина $|\cos(\varphi_i)|$ максимальна. Амплитуда экстремума функции качества (ФК), соответствующего данному отражению, будет иметь максимальное значение;
- при наличии залежи углеводородов в продуктивной толще величина $|\cos(\varphi_i)|$ минимальна. Амплитуда экстремума ФК, соответствующего данному отражению, будет иметь минимальное значение;
- для водонасыщенной песчаной толщи величина $|\cos(\varphi_i)|$ занимает промежуточное положение между 0 и 1. Амплитуда соответствующего экстремума ФК при этом будет также принимать значение в промежутке между минимумом и максимумом.

Таким образом, зоны с аномально низкой амплитудой функции качества могут являться прогнозными на наличие залежи углеводородов. Требуется на основе выделенной аномалии функции качества разработать алгоритм фазоэнергетического анализа (ФЭА) сейсмических волн, провести его исследования на моделях и реальных данных. Для построения алгоритма использовался метод фазочастотной деконволюции [20].

Фазоэнергетический анализ сейсмических волн

Как показано выше, для решения задач прогноза нефтегазоносности можно непосредственно использовать

функцию качества $L(t)$, формируемую при фазочастотной деконволюции. Тогда, с целью расчленения тонкослойной структуры геологической среды и подавления шумов, для построения алгоритма фазоэнергетического анализа необходимо предварительно вычислить функцию:

$$G(t) = \sum_{k=1}^M L_k(t) = \sum_{k=1}^M \sum_{i=0}^{n-1} w_k(f_i) \cos[\varphi(f_i, t)], \quad (1)$$

которая является суммой функций качества $L_k(t)$, получаемых при фазочастотной деконволюции [20]. Функция $G(t)$ определяется для всего выбранного фрагмента разреза ОГТ, т. е. формируется совокупность значений функций $G(t, x)$, определенных на интервале $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$, $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$. Данная функция характеризует пространственно-временной разрез высокой разрешенности. Основными назначениями данного разреза являются:

- выделение пространственно-временных зон аномально низких значений амплитуд, соответствующих прогнозным зонам;
- разделение аномальных зон по степени интенсивности;
- наглядное представление структурно-литологического состава разреза.

Следует отметить, что непосредственное использование таких разрезов с целью выделения прогнозных зон вызывает определенные затруднения, так как каждая трасса разреза имеет вид квазипериодической последовательности положительных и отрицательных амплитуд. Поэтому производится дополнительная обработка разрезов, заключающаяся в вычислении энергии функции $G(t, x)$, осредненной на некоторой базе наблюдения x_b, t_b :

$$E(t, x) = \frac{1}{x_b t_b} \sum_{x' = \frac{x - x_b}{2}}^{\frac{x + x_b}{2}} \sum_{t' = \frac{t - t_b}{2}}^{\frac{t + t_b}{2}} G^2(t', x'). \quad (2)$$

При этом размеры базы наблюдения выбираются в зависимости от частотного состава сейсмических данных и решаемых задач.

В результате формируется пространственно-временная функция энергий – фазоэнергетическая функция. Результат визуализации данной функции в цветокодированном виде представляет фазоэнергетический разрез (ФЭР). Для задания уровней цветокодирования используются результаты испытаний скважин. Анализ функции $E(t, x)$, проведенный в рамках принятой информационной модели среды, показывает, что она, как и функция качества, непосредственно связана с петрофизическими свойствами осадочных толщ. При этом появление аномальных значений поглощения и акустических свойств среды в области залежи приводит к появлению аномалий и в поведении функции $E(t, x)$. Таким образом, значения функции $E(t, x)$ могут использоваться как прогнозные параметры при выделении залежей углеводородов.

Приведем отдельные результаты, полученные при исследовании фазоэнергетического анализа на некоторых моделях слоистых сред, параметры которых заданы применительно к условиям верхнеюрской толщи.

Результаты вычислительного эксперимента на моделях

Первый этап исследования эффективности фазоэнергетического анализа заключается в построении

моделей сейсмических волновых полей. Каждая модель соответствует различным геологическим средам, которые характеризуются своей скоростью, плотностью и параметром поглощения. Данные параметры изменяются в зависимости от литологического состава среды, степени уплотнения и ряда других факторов и выбирались близкими к параметрам верхнеюрского продуктивного горизонта Томской области.

Для исследования было выбрано 5 моделей:

- модель 1-2: слева – водонасыщенный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник;
- модель 1-3: слева – глинизованный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник;
- модель 2-3: слева – глинизованный песчаник, справа – водонасыщенный песчаник;
- модель 2-4: слева – водонасыщенный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник;
- модель 3-4: слева – глинизованный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник.

При этом для всех моделей в качестве покрывающей толщи принимались аргиллиты Баженовской свиты, а в качестве подстилающей свиты – аргиллиты. Численные значения параметров моделей выбирались исходя из реальных данных. В качестве примера в таблице приведены параметры модели 1. Здесь β – коэффициент поглощения; V – скорость среды, ρ – плотность среды, h – мощность толщи. Далее для всех моделей рассчитывались сейсмические характеристики: скорость, плотность и коэффициент поглощения. Изменения сейсмических характеристик продуктивной толщи вдоль профиля наблюдения для модели 1-2 приведены на рис. 1. Для построения моделей волновых полей использовался импульс с колокольной огибающей с параметрами: основная частота $f_0=30$ Гц, коэффициент затухания $b=45$. Полученные сейсмические волновые поля приведены на рис. 2.

Таблица. Численные значения параметров модели 1
Table. Numerical values of model 1 parameters

Модель 1/Model 1	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 (Баженовская пачка) Mudstones (Bazhenov member)	2700	2,50	0,000015	20
Нефтенасыщенный песчаник Oil-saturated sandstone	3120	2,37	0,000073	20
Аргиллиты/Mudstones	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	¥

Далее для всех моделей рассчитывались сейсмические характеристики: скорость, плотность и коэффициент поглощения. Изменения сейсмических характеристик продуктивной толщи вдоль профиля наблюдения для модели 1-2 приведены на рис. 1.

Для построения моделей волновых полей использовался импульс с колокольной огибающей с параметрами: основная частота $f_0=30$ Гц, коэффициент затухания $b=45$. Полученные сейсмические волновые поля приведены на рис. 2.

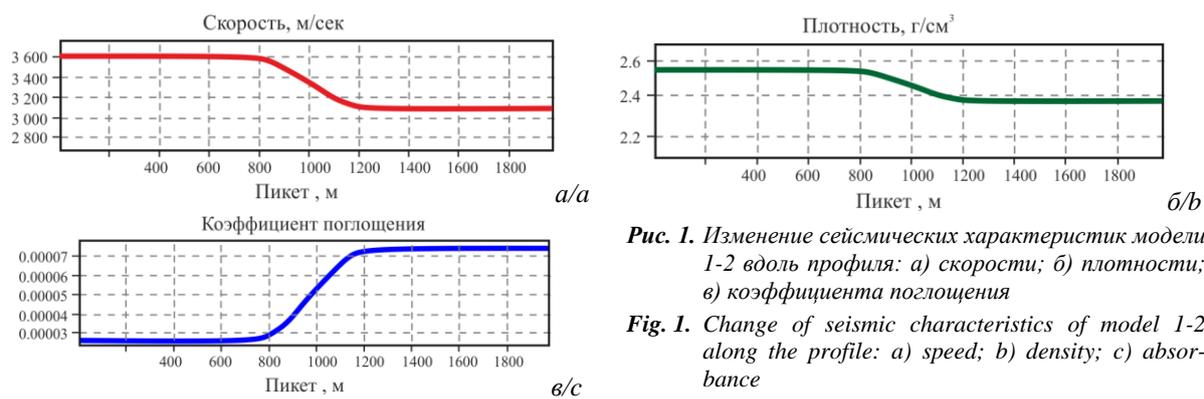


Рис. 1. Изменение сейсмических характеристик модели 1-2 вдоль профиля: а) скорости; б) плотности; в) коэффициента поглощения

*Fig. 1. Change of seismic characteristics of model 1-2 along the profile: a) speed; b) density; c) absor-
 bance*

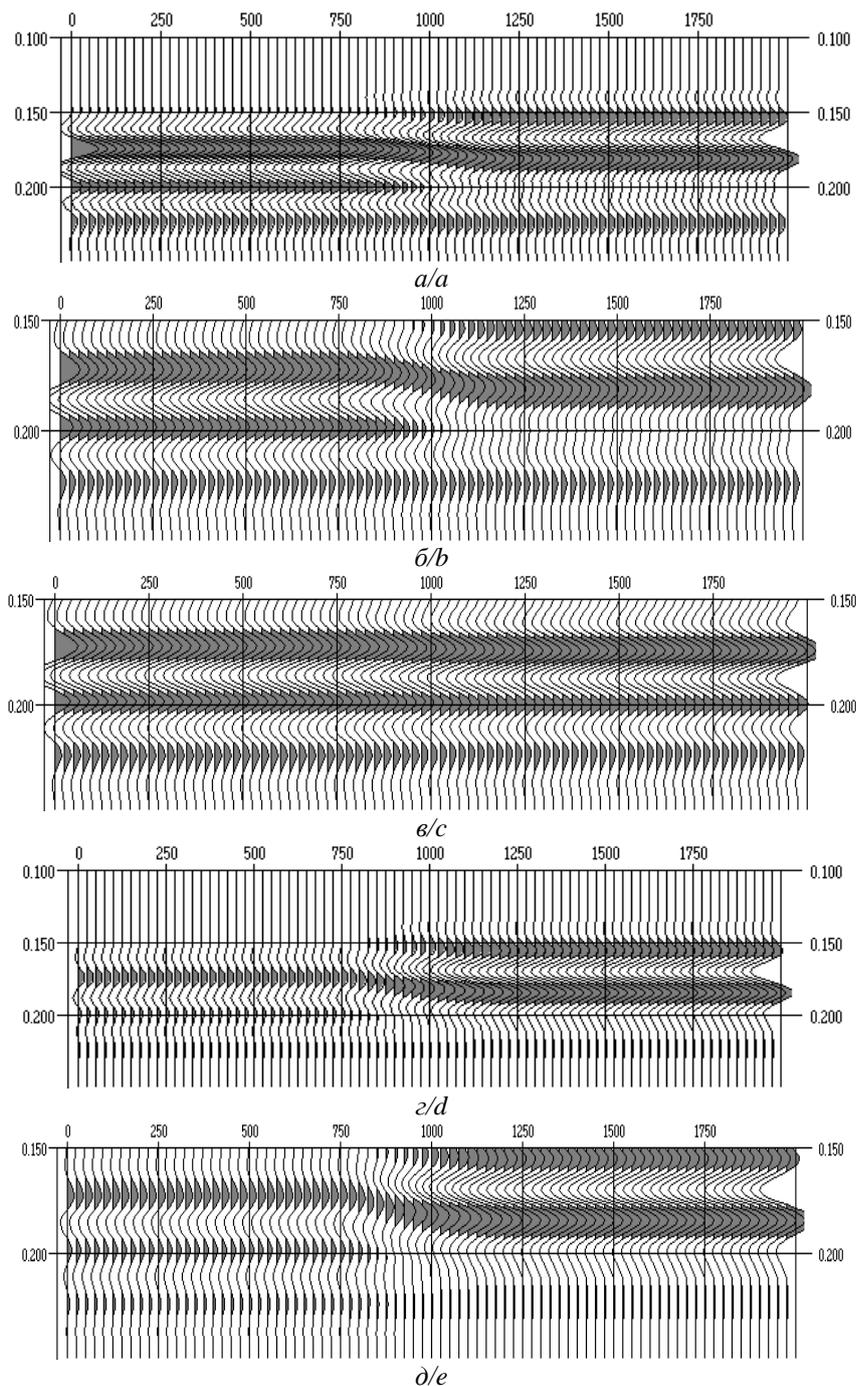


Рис. 2. Модели волновых полей: а) 1-2; б) 1-3; в) 2-3; г) 2-4; д) 3-4

Fig. 2. Wavefield models: a) 1-2; b) 1-3; c) 2-3; d) 2-4; e) 3-4

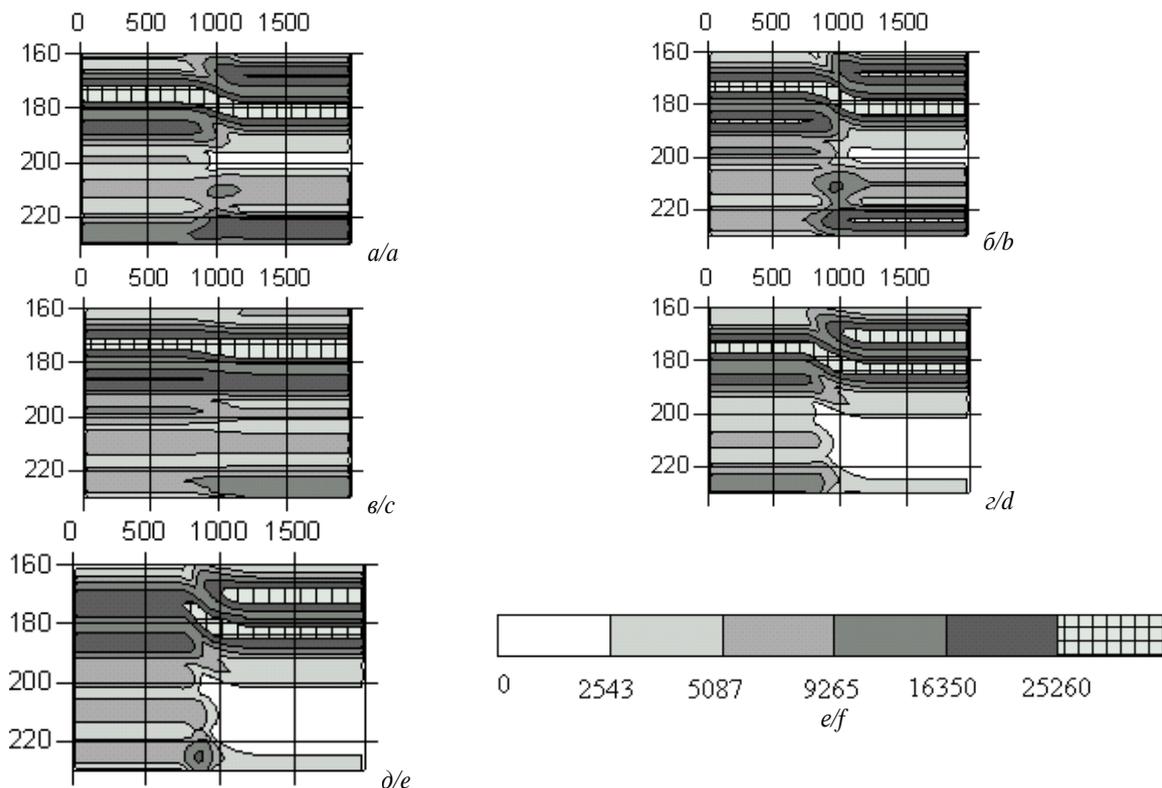


Рис. 3. Фазоэнергетические разрезы для исследуемых моделей сейсмических волновых полей в цветокодированном виде: а) модель 1-2 (слева – водонасыщенный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник); б) модель 1-3 (слева – глинизованный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник); в) модель 2-3 (слева – глинизованный песчаник, справа – водонасыщенный песчаник); г) модель 2-4 (слева – водонасыщенный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник); д) модель 3-4 (слева – глинизованный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник); е) шкала цветокодировки; цифрами обозначена амплитуда ФЭР

Fig. 3. Phase-energy sections for the studied models of seismic wave fields in color-coded form: a) model 1-2 (left – water-saturated sandstone, right – oil-saturated sandstone); b) model 1-3 (left – shaly sandstone, right – oil-saturated sandstone); c) model 3-4 (left – shaly sandstone, right – gas-saturated sandstone); d) model 2-4 (left – water-saturated sandstone, right – gas-saturated sandstone); e) model 2-3 (left – shaly sandstone, right – water-saturated sandstone); f) color scale; the numbers indicate the amplitude of the FER

Далее сгенерированные волновые поля использовались для получения фазоэнергетических разрезов. На этом этапе исследования сначала для сформированных моделей сейсмических волновых полей были вычислены пространственно-временные разрезы $G(t, x)$, полученные на основании выражения (1). При этом использовались следующие параметры: длительность окна прослеживания – 72 мс, 14 весовых функций с крутизной 0,8 ($M=14$ в выражении (1)), центральная частота первого фильтра – 6 Гц, центральная частота последнего фильтра – 90 Гц.

Затем вычислялись энергетические характеристики (2), в результате чего были сформированы необходимые для анализа фазоэнергетические разрезы. Изображения фазоэнергетических разрезов в цветокодированном виде приведены на рис. 3. Из рис. 3, а, б, г, д видно, что области, соответствующие зонам с УВ, на фазоэнергетических разрезах имеют anomalously низкую амплитуду ФЭР и отображаются на цветокодированном разрезе в виде белых областей. В то же время в областях, соответствующих глинизованному песчанику и аргиллитам, наблюдаются наибольшие значения амплитуды ФЭР. В областях, соответствующих

водонасыщенному песчанику (рис. 3, а, в, г), амплитуды ФЭР имеют средние значения. Это полностью согласуется с результатами теоретических рассуждений, приведенных выше.

В целом можно сказать, что данные результаты свидетельствуют о значимых информационных возможностях ФЭА при решении задач ПГР, в том числе прогноза нефтегазоносности продуктивных толщ.

Фазоэнергетический анализ реальных сред

В качестве примера, иллюстрирующего эффективность предлагаемого подхода, на рис. 4 приведен фрагмент фазоэнергетического разреза [21] для верхнеюрских отложений в направлении линии Р2-ПВ (разведочная скважина – пункт взрыва, указанный выше скважины). На фрагменте разреза наблюдаются области с аномальными значениями фазоэнергетической функции (белые пятна) на расстояниях 500–700 м от устья скважины (рис. 4), что говорит о возможности выделения нефтегазоперспективных зон. Подтверждением сказанному является небольшой приток нефти, который был получен при испытании скважины Р2 в интервале верхнеюрских отложений.

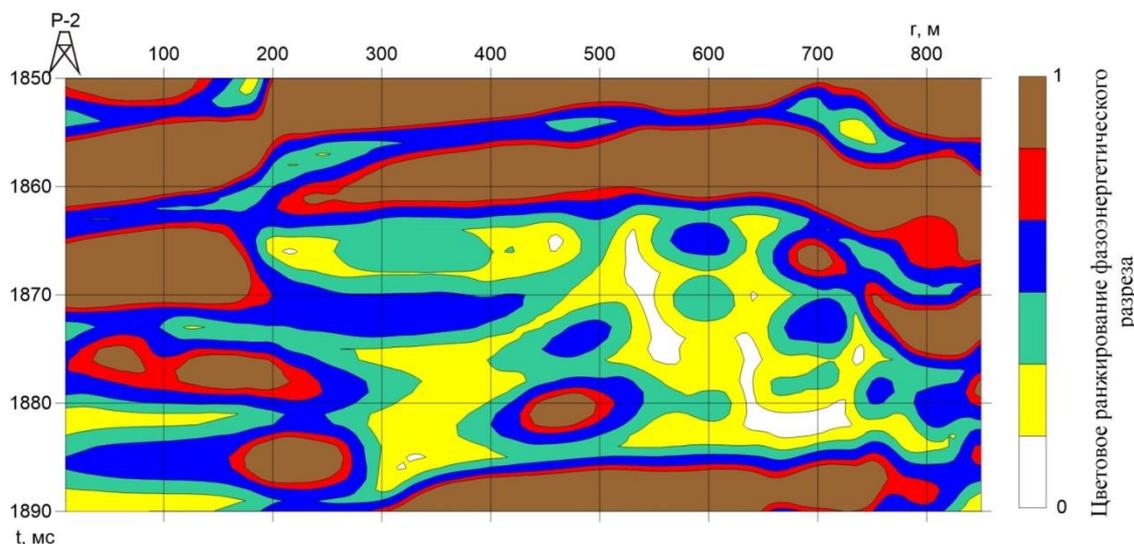


Рис. 4. Фрагмент фазоэнергетического анализа для интервала верхнеюрских отложений
Fig. 4. Fragment of the phase-energy analysis for the Upper Jurassic interval

Заключение

На базе предложенного ранее метода фазочастотной деконволюции разработан алгоритм фазоэнергетического анализа сейсмических волн. В основу алгоритма положены характерные особенности фазовых спектров сейсмических волн, отраженных от границ продуктивной толщи, содержащей углеводороды. Для оценки эффективности алгоритма путем вычислительного эксперимента проведены исследования на различных моделях геологических сред. При этом каждая модель соответствовала геологическим средам, которые характеризовались своей скоростью, плотностью и параметром поглощения. Численные значения параметров сред задавались исходя из литологического состава среды, степени уплотнения и ряда других факто-

ров и выбирались близкими к параметрам верхнеюрского продуктивного горизонта Томской области. По результатам проведения фазоэнергетического анализа были построены фазоэнергетические разрезы, позволяющие проводить прогноз геологического разреза на предмет наличия углеводородов. Для этих целей предлагается на изображениях фазоэнергетических разрезов выделять зоны с аномально низкими значениями энергии. Приведенный пример построения фазоэнергетического разреза по реальным данным в интервале верхнеюрских отложений подтверждает перспективность применения фазоэнергетического анализа для прогноза геологического разреза.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 23-21-00259).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Fuh D., Cohen I., Vassiliou A. A. Three-dimensional sparse seismic deconvolution based on Q attenuation model // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – Anaheim, California, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2018. – P. 491–495.
- Lines L.R., Treitel S. Cascaded deconvolution filters // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – Anaheim, California, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2018. – P. 4091–4095.
- Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data // Global Geology. – 2015. – V. 18 (4). – P. 226–231.
- Оценка автокорреляционных функций данных инженерной сейсморазведки при выполнении деконволюции / В.В. Романов, К.С. Сергеев, М.Д. Кауркин, А.А. Иванов // Геофизика – 2022. – № 1. – С. 77–83.
- Станкевич Л.С. Обработка сейсмических разрезов методом динамического сжатия // Геофизика, геофизическое приборостроение. – 2015. – № 1 (21). – С. 78–85.
- Митрофанов Г.М. Гомоморфная фильтрация и слепая деконволюция // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 46–56.
- Egbai J.C., Atakro E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria // Advances in Applied Science Research. – 2012. – V. 3 (1). – P. 520–529.
- Кунченко Д.С., Овчинников К.Р., Фиников Д.Б. О задачах деконволюции сейсмических записей и возможностях контроля искажений формы сигнала // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2022. – № 3. – С. 79–88.
- Кунченко Д.С., Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Влияние фазового спектра сигнала на результаты робастной деконволюции // ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии: Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки. – Тверь, ООО «Пол-лиПРЕСС», 2020. – Т. III (III). – С. 45–48.
- Фиников Д.Б. Симметрирующие фильтры // Технологии сейсморазведки. – 2007. – № 1. – С. 26–36.
- Сильвия М.Т., Робинсон Э.А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – М.: Недра, 1983. – 382 с.
- Lindberg D.V., More H. Blind categorical deconvolution in two-level hidden Markov models // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – V. 52. – P. 7435–7447.
- Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel deconvolution of seismic signals using statistical MCMC methods // IEEE Transactions on signal processing. – 2010. – V. 58. – № 5. – P. 2757–2770.
- Deconvolution of seismic signals in time and frequency domain / Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2011. – V. 4. – № 1. – P. 29–47.
- Optimal seismic deconvolution: distributed algorithms / K.N. Plataniotis, S.K. Katsikas, D.G. Lainiotis, A.N. Venetsanopoulos // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – V. 36. – P. 779–792.
- Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints // First break. – 2004. – V. 22. – P. 47–70.

17. 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.
18. Овчинников К.Р., Рябинский М.А., Фиников Д.Б. Фазовая деконволюция 3D данных сейсморазведки. Технологические и методологические аспекты применения статистического алгоритма коррекции фазового спектра // Геофизика. – 2022. – № 3. – С. 16–22.
19. 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.
20. Фазочастотная деконволюция сейсмических волн / А.И. Кочегуров, Е.А. Кочегурова, И.Э. Ильясова, V. Geringer, K. Reif // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 84–93.
21. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения окоскважинного пространства // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 58–63.

Поступила: 05.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 20.04.2023 г.

Информация об авторах

Кочегуров А.И., кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кочегурова Е.А., кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Орлов О.В., кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.834

APPLICATION OF PHASE-ENERGY ANALYSIS OF SEISMIC WAVES FOR GEOLOGICAL SECTION PREDICTION

Alexander I. Kochegurov¹,
kaicc@tpu.ru

Elena A. Kochegurova¹,
kocheg@mail.ru

Oleg V. Orlov¹,
orloff234@gmail.ru

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

Relevance. One of the main tasks in predicting a geological section is the task of determining the type of the section and mapping types over the area under study, as well as assessing the absorbing and dispersive properties of geological media. To solve these problems, specialized software-algorithmic complexes for processing and interpreting seismic data are currently widely used. In most modern complexes for forecasting a geological section, the information extracted from the kinematic and dynamic characteristics of seismic waves is used. Based on the information received and the data on the geophysical survey of wells, ideas are formed about the material composition of sediments, the presence of productive strata in the study area. This approach made it possible in a number of regions of Russia, including Western Siberia, to obtain interesting and important results related to the discovery of productive sedimentary strata and the assessment of their oil and gas content, which was confirmed by practice. At the same time, the results of practical activities have shown that when conducting studies of many areas, there are areas where the percentage of identifying false anomalies in geological environments and making erroneous decisions in the forecast is still quite large. This is due, among other things, to the fact that in the analysis of the recorded seismic field, for predicting geological section, the energy characteristics of the reflected waves are mainly used, and changes in the phase spectra are practically not taken into account. Thus, the integrated use of the characteristics of reflected seismic waves (amplitude and phase) in the prediction of a geological section is a very urgent task.

The aim of the work is to carry out phase-energy analysis for various models of seismic fields based on the method of phase-frequency deconvolution for predicting the geological section.

Methods: computational experiment, inverse filtering, discrete Fourier transform.

Results. The authors developed the algorithm for phase-energy analysis of seismic waves, which is based on the results of phase-frequency deconvolution. The algorithm was studied on various models of geological environments, and phase-energy sections were constructed, which make it possible to identify zones with anomalously low energy values for subsequent oil and gas potential diagnostics. The paper introduces the example of constructing a phase-energy section based on real data in the interval of Upper Jurassic deposits.

Key words:

geological section prediction, phase-frequency deconvolution, phase-energy analysis, inverse compression filter, models of geological environments.

The research was supported by the RSF grant (no. 23-21-00259).

REFERENCES

- Fuh D., Cohen I., Vassiliou A. A. Three-dimensional sparse seismic deconvolution based on Q attenuation model. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Anaxeim, California, USA, Society of Exploration Geophysicists, 2018. pp. 491–495.
- Lines L.R., Treitel S. Cascaded deconvolution filters. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Anaxeim, California, USA, Society of Exploration Geophysicists, 2018. pp. 4091–4095.
- Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data. *Global Geology*, 2015, vol. 18 (4), pp. 226–231.
- Romanov V.V., Sergeev K.S., Kaurkin M.D., Ivanov A.A. Estimate of near-surface seismic data auto-correlation functions in deconvolution process. *Geophysics*, 2022, no.1, pp. 77–83. In Rus.
- Stankevich L.S. Obrabotka seysmicheskikh razrezov metodom dinamicheskogo szhatiya [Processing seismic cuts by the method of dynamic compression]. *Geofizika, geofizicheskoe priboro-stroenie*, 2015, no. 1 (21), pp. 78–85.
- Mitrofanov G.M. Homomorphic filtering and deconvolution. *Technologies of seismic exploration*, 2015, no. 1, pp. 46–56. In Rus.
- Egbai J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3 (1), pp. 520–529.
- Kunchenko D.S., Ovchinnikov K.R., Finikov D.B. O zadachakh dekonvolutsii seismichikh zapiseiy vozmozhnostyakh kontrolya iskazheniy formy signala [On the problems of deconvolution of seismic records and the possibilities of controlling waveform distortions]. *Instruments and systems for exploration geophysics*, 2022, no. 3, pp. 79–88.
- Kunchenko D.S., Finikov D.B., Shalashnikov A.V. Vliyaniye fazovogo spektra signala na rezultaty robastnoy dekonvolutsii [Influence of the phase spectrum of a signal on the results of robust deconvolution]. *Proceedings of the III International Geological and Geophysical Conference and Exhibition. GeoEurasia 2020. Modern technologies for the study and development of the bowels of Eurasia*. Tver, PolyPRESS LLC, 2020. Vol. III (III), pp. 45–48.
- Finikov D.B. Balancing filters. *Technologies of seismic exploration*, 2007, no. 1, pp. 26–36. In Rus.
- Silvia M.T., Robinson E.A. Obratnaya filtratsiya geofizicheskikh vremennykh ryadov pri razvedke na nefi i gaz [The return filtration of geophysical temporary ranks at investigation on oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 382 p.
- Lindberg D.V., More H. Blind categorical deconvolution in two-level hidden Markov models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, pp. 7435–7447.

13. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel deconvolution of seismic signals using statistical MCMC methods. *IEEE Transactions on signal processing*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 2757–2770.
14. Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty. Deconvolution of seismic signals in time and frequency domain. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 29–47.
15. Plataniotis K.N., Katsikas S.K., Lainiotis D.G., Venetsanopoulos A.N. Optimal seismic deconvolution: distributed algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, vol. 36, pp. 779–792.
16. Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints. *First break*, 2004, vol. 22, pp. 47–70.
17. 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.
18. Ovchinnikov K.R., Ryabinskiy M.A., Finikov D.B. Phase deconvolution of 3D seismic data technological and methodological aspects of statistical algorithm for phase spectrum correction. *Geophysics*, 2022, no. 3, pp. 16–22. In Rus.
19. 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.
20. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Ilyasova I.E., Geringer V., Reif K. Phase-frequency deconvolution of seismic waves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 84–93. In Rus.
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: 5 April 2023.
Reviewed: 20 April 2023.*

Information about the authors

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

Elena A. Kochegurova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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