

Как видно из графика, процесс достаточно быстро сходится на начальных итерациях и за 100-200 итерации достигает невязки менее 5%, а за 700-800 итераций менее 1%.

В колонке 4 таблицы 1 приведен результат решения обратной задачи ВЭЗ методом дифференциальной эволюции. В колонке 5 рассчитаны относительные отклонения полученных параметров разреза, от модельных. Как видно из числовых характеристик, решение имеет значения сопоставимые с истинными величинами при поиске решения в достаточно широком диапазоне возможных значений параметров разреза.

Выводы

В заключение следует отметить, что в данном примере алгоритм решения обратной задачи реализован простейшим способом. Однако метод дифференциальной эволюции имеет более широкие возможности, благодаря простоте реализации и простому требованию к функции цели – это возможность ее прямого вычисления. Например, значения векторов популяции могут быть заданы не величинами $w = \{ \rho_1, \dots, \rho_N, h_1, \dots, h_N \}$, а любыми характеристиками описывающими искомое решение, которые либо связаны с параметрами разреза, либо вычисляются на их основе. В качестве функции цели может выступать не только невязка кривых (которая, кстати, может быть вообще одной из координат вектора), а какие либо априорные представления о конечном результате, выраженные в численной форме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований / ГИ УрО РАН. – М.: Науч. мир, 2007. – 247 с.
2. Пантелеев А.В., Дмитраков И.Ф. Применение метода дифференциальной эволюции для оптимизации параметров аэрокосмических систем // Труды МАИ. – 2010. – № 37. – С. 7.
3. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. – М.: МАИ-Принт, 2009. – 160 с.
4. Электроразведка методом сопротивлений / под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. – М.; Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
5. Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // Journal of Global Optimization. – 1997. – V. 11, № 4. – P. 341 - 359. – DOI: 10.1023/A:1008202821328.
6. neuronus.com. Портал знаний об искусственном интеллекте. – Текст электронный. – URL: <https://neuronus.com/> (Дата обращения 23.08.2021).

УДК 550.8.056

DOI:10.7242/echo.2021.3.12

ВЕРИФИКАЦИЯ ЭМПИРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ROCK PHYSICS ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД В ЗАДАЧЕ ОДНОМЕРНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Б. Трапезникова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. Выполнена верификация эмпирических уравнений Faust L.Y. и Н.З. Заляева для формирования петрофизической основы в задаче одномерного сейсмоакустического моделирования. Представлен процесс синтезирования акустического каротажа и анализ полученных результатов для разреза кунгурских отложений северо-западного борта Прикаспийской впадины (Приволжской моноклинали).

Ключевые слова: акустический каротаж, скорость продольной волны, уравнение Faust L.Y., уравнение Н.З. Заляева, одномерное моделирование волнового поля, Rock Physics.

Введение

В последнее время большую популярность в рамках прогноза и изучения упругих свойств пород набирают методы Rock Physics [1]. Полнота и качество геофизических исследований скважин (ГИС) является основным критерием для решения различных задач, возникающих в процессе совместной интерпретации скважинных, наземных и шахтных сейсмических данных: одномерное сейсмоакустическое моделирование, сейсмостратиграфическая привязка, оценка формы сигнала, прогноз физико-механических свойств разреза, выбор типа сейсмической интерпретации.

В случае отсутствия необходимой скважинной информации методы Rock Physics позволяют восстанавливать недостающие данные посредством регрессионных связей между физическими свойствами пород. Использование такого подхода дает возможность прогнозирования данных акустического (АК) и плотностного (ГГК-п) каротажей которые, как правило, имеют ограниченную сетку покрытия по разрезу или полностью отсутствуют.

Наиболее популярными подходами Rock Physics для синтеза недостающих кривых являются эмпирические модели: Гарднера – для прогноза значений плотности (ГГК-п); Faust L.Y. и Н.З. Заляева. для оценки скорости продольных волн. Данные эмпирические зависимости освещены в литературе и реализованы во многих интерпретационных пакетах в нефтегазовой отрасли для терригенных и карбонатных разрезов [2]. Применение данных подходов для эвапоритовых типов разреза менее известно.

Анализ адаптивности эмпирических подходов для прогноза физических свойств эвапоритовых разрезов представляется актуальным. Объем входной информации ограничивается узкой сеткой бурения на месторождениях легкорастворимых полезных ископаемых. Геолого-геофизические исследования здесь базируются в основном на старом фонде скважин, со стандартным комплексом ГИС. Верификация имеющихся эмпирических подходов позволит дать оценку погрешности петрофизического прогноза и возможностей данных подходов для эвапоритового типа разреза.

Литолого-геофизическая характеристика разреза

Разрез кунгурских отложений исследуемого участка соответствует нижнепермской галогенной формации, представленной переслаиванием различных эвапорит-литологических разностей. На основании анализа данных керна в исследуемом разрезе условно выделяется семь литотипов пород: доломит, ангидрит, смешанная ангидрит-доломитовая порода, каменная соль, смешанная ангидрит-галитовая порода, сильвинит и смешанная карналлит-галитовая порода (рис. 1).

Продуктивные соленосные отложения кунгура перекрывает карбонатно-сульфатная толща, характеризующаяся достаточно дифференцированным акустическим разрезом за счет тонкого пререслаивания ангидрита и доломита, реже каменной соли. Скоростная характеристика в пределах толщи изменяется от 4100 до 7000 м/с. В соленосном интервале скорости продольных волн изменяются в пределах 4150-4800 м/с.

По результатам анализа керна и данных ГИС отложения кунгурского яруса характеризуются нестабильными скоростными характеристиками в виду сложности строения разреза и наличия структурных и литологических факторов осложняющих скоростную картину (рис. 1).

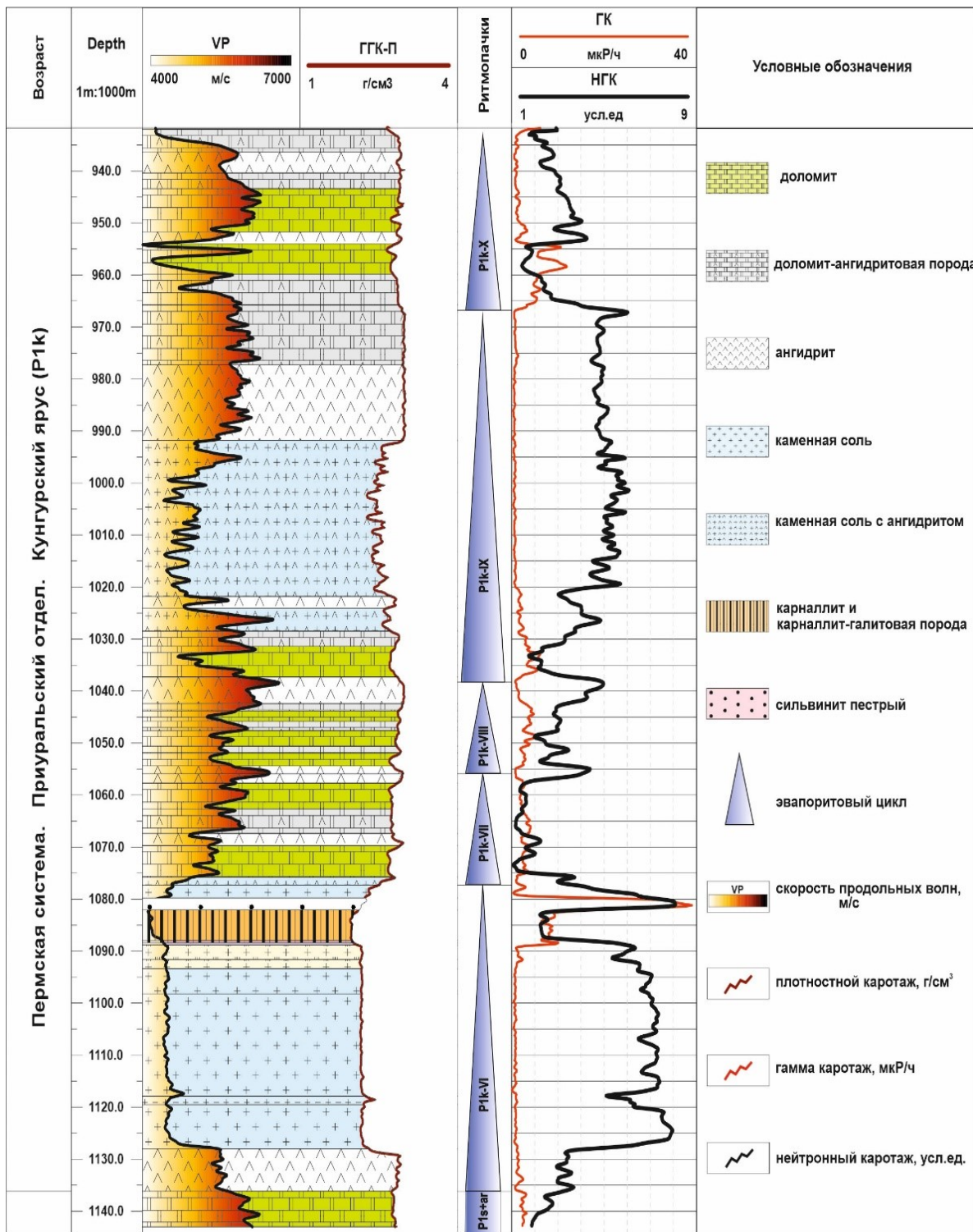


Рис. 1. Литолого-геофизическая колонка разреза кунгурских отложений Приволжской моноклинали

Эмпирические уравнения Rock Physics

Наиболее достоверным источником информации о скорости продольных волн являются данные акустического каротажа (АК). Показания данного метода должны максимально корректно отображать реальные скоростные характеристики разреза, т.е. эти данные не должны быть подвержены влиянию различного рода искажающих факторов. Получить такую информацию прямыми замерами в скважинном

пространстве практически невозможно, поскольку исходные данные, получаемые в скважинных условиях, всегда имеют погрешности технологического или геолого-геофизического характера. Снижение качества кривых акустического каротажа в основном связано с влиянием каверн в интервалах размытых глинистых пород и карналлита, наличием выбросов и «Z-эффектов». С данной позиции получение недостающих кривых ГИС посредством подходов Rock Physics представляется более корректным, поскольку позволяет учесть влияние различных факторов на запись кривых.

Уравнение Faust L.Y

В 1950-х годах Faust L.Y [3-4] в своих работах представил эмпирическое уравнение зависимости между удельным электрическим сопротивлением и скоростью продольных волн в осадочных породах. Изначально зависимость представлена без учета литологической составляющей. В работе [4], опубликованной позднее, Faust L.Y скорректировал учет влияния литологии на скорость продольных волн посредством удельного электрического сопротивления пород:

$$dT = a(ZR)^b,$$

где dT – интервальное время пробега продольной волны, Z – истинная вертикальная глубина (с учетом удлинения), R – удельное электрическое сопротивление (Ом/м), a и b – нормировочные коэффициенты уравнения, подбираемые для каждого литотипа. Примеры кросс-плотов для подбора нормировочных коэффициентов представлены на рисунке 2.

На рисунке 3 представлен планшет скважины X-2, на котором изображена расчетная кривая DT_Faust , и производные от нее: кривая скорости продольных волн VP_Faust и акустический импеданс AI_Faust . Как видно на планшете, расчетная кривая по Faust L.Y отличается от формы кривой DT , первично зарегистрированной в данной скважине. Синтезированная кривая AK по методике Faust L.Y получается сильно дифференцируемой, и при ее сглаживании и перемасштабировании теряется часть геологической информации в интервалах маломощных пластов.

Также одним из важных недостатков методов синтеза AK по данным электрометрики являются определенные ограничения при работе с тонкослоистым разрезом, имеющим большой диапазон сопротивлений ввиду своего сложного строения. Следует отметить, что зависимость сопротивлений и скорости продольных волн в эвапоритовом разрезе отличается слабой корреляцией и носит бессистемный характер ввиду наличия высокоомных пород с сопротивлениями равного ранга и порой с незначительными различиями в скоростях.

В целом, как видно на рисунке 2, полученные значения AK по методу Faust.L.Y носят удовлетворительный характер, поскольку обладают достаточной сходимостью с реальными данными. Эта методика характеризуется низкой достоверностью в интервалах доломитовых пород, поскольку значения DT получают заниженными, и в интервалах ангидритовых пород – значения DT по данной методике завышаются.

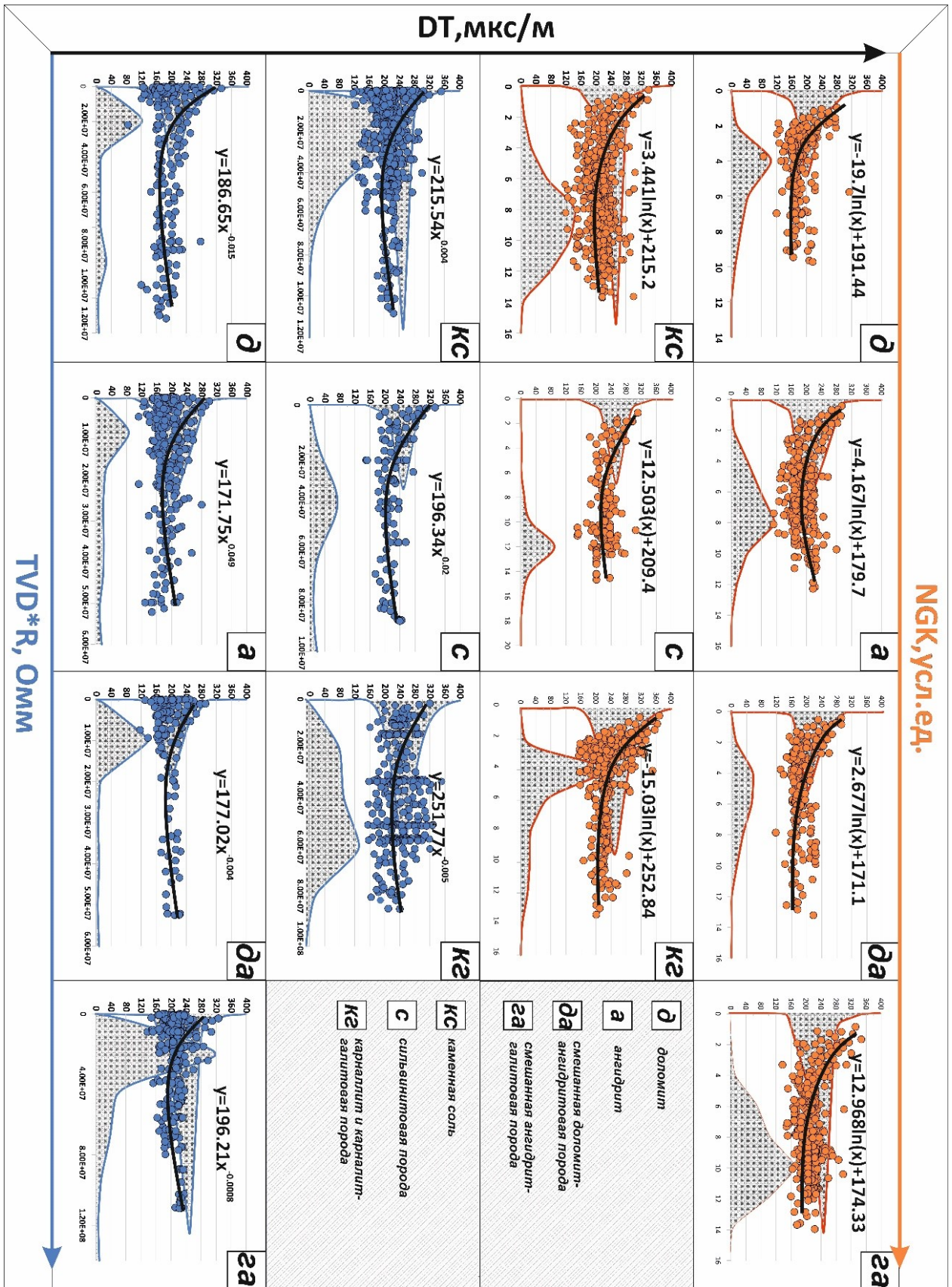


Рис. 2. Кросс-плоты сопоставления физических характеристик пород по данным ГИС.

Синие графики: сопоставление данных АК и TVD*R. Оранжевые графики: сопоставление данных АК и НКК.

Кросс-плоты представлены для каждого из 7 литотипов

Уравнение Н.З. Заляева

Методика Н.З. Заляева основывается на зависимости времен пробега продольной волны от показания нейтронного каротажа (НГК) [5]:

$$dT = a * Ln_{10}(NGK) + b,$$

где dT – интервальное время пробега продольной волны, NGK – показания нейтронного каротажа, a и b – нормировочные коэффициенты уравнения. Подбор нормировочных коэффициентов осуществлялся отдельно для каждого из семи литотипов (рис. 2).

Для построения данной зависимости выбираются опорные скважины с приемлемым качеством записи АК и НГК. Зависимость между данными методами ГИС носит более стабильный характер и характеризуется более устойчивыми связями в эвапоритовом разрезе, чем связь АК и удельного электрического сопротивления. Для получения корректной зависимости предварительно данные АК и НГК корректируют и нормализуют [5].

Сопоставление расчетных кривых по методике Н.З. Заляева и первичных данных приведено на рисунке 2. Как видно из планшета, расчетные кривые имеют форму, отличную от зарегистрированных данных, но в целом отображают общий тренд изменения интервальных времен. Из рисунка 2 видно, что расчетные кривые меньше подвержены влиянию искажений, таких как «ложные выбросы», вызванные переходом с одного диаметра скважины на другой (выделен фиолетовым цветом) и влиянию каверн напротив карналлитового пласта и пласта глинистого доломита (выделены оранжевым цветом).

В отличие от расчетной кривой, построенной по методике Faust L.Y, представленная кривая имеет большую сходимость с реальными данными в интервалах доломитовых и ангидритовых пород, а также в интервалах их тонкого переслаивания. Как показывает опыт, применение подхода Н.З. Заляева к синтезированию АК по данным НГК является одним из самых достоверных. Важным преимуществом является возможность применения данного подхода к скважинам старого фонда, не имеющим в своем комплексе методов высокоразрешающей электротомии. Но стоит отметить, что эта методика работает только с результатами НГК, полученными в открытом стволе, т.к. НГК очень чувствителен к стальной конструкции скважины. В случае отсутствия замеров НГК в открытом стволе скважины данные нормируют на фоновые значения опорной скважины.

Методика сейсмоакустического моделирования

Комплексная интерпретация скважинных и шахтных сейсмических данных позволяет прогнозировать физические характеристики исследуемой геологической среды и решать различные задачи. Вышеуказанные разномасштабные системы данных связываются посредством одномерного сейсмоакустического моделирования, определяемого как результат свертки импульсной характеристики $h(t)$ среды с формой сейсмического сигнала $s(t)$, описываемого уравнением [6]:

$$f(t) = s(t) * h(t),$$

где $s(t)$ – форма сейсмического сигнала, $h(t)$ – импульсная характеристика среды (ИХС).

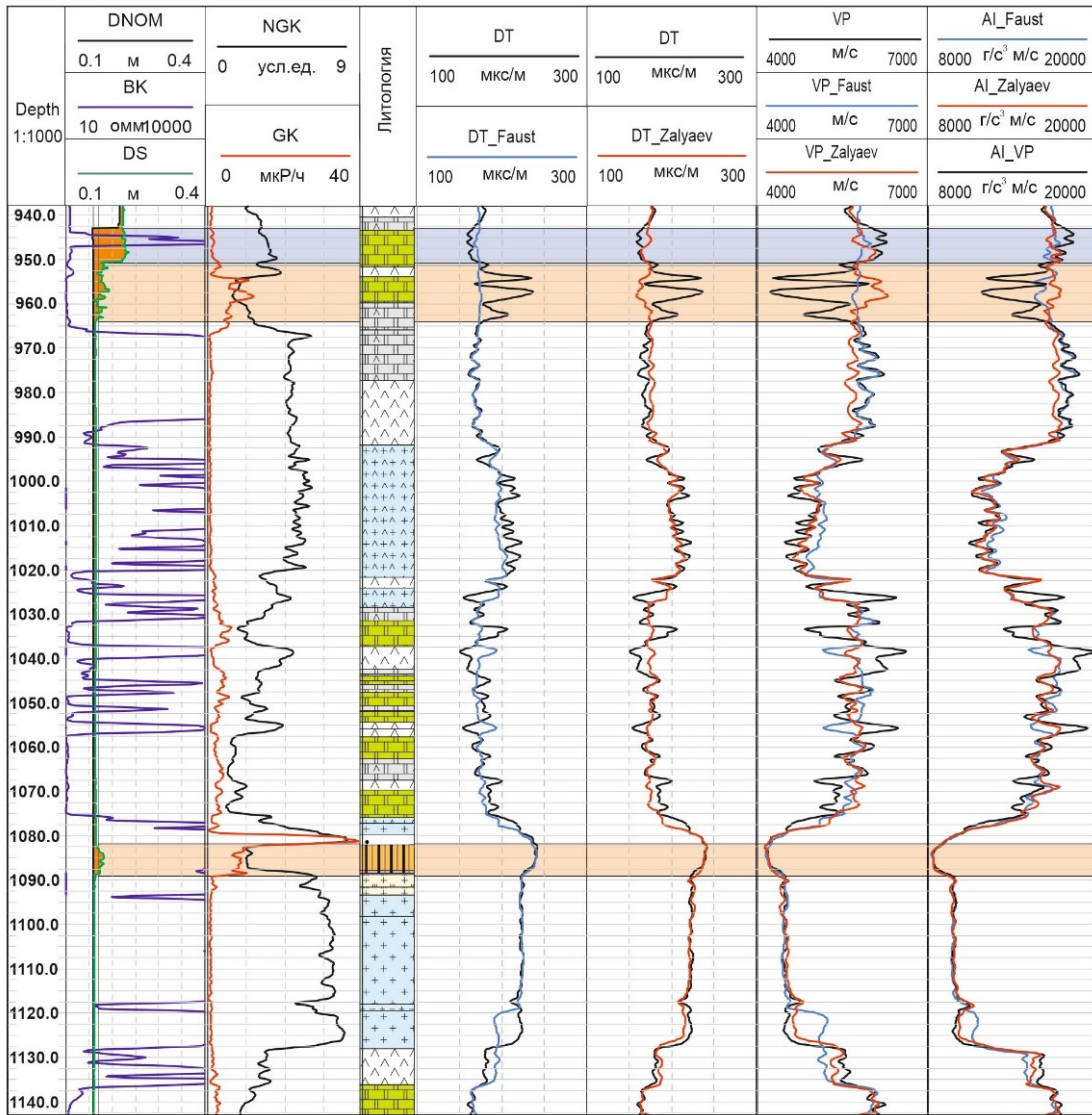


Рис. 3. Планшет скважины X-2 с синтезированными кривыми АК по Faust L.Y и Н.З. Залаяву

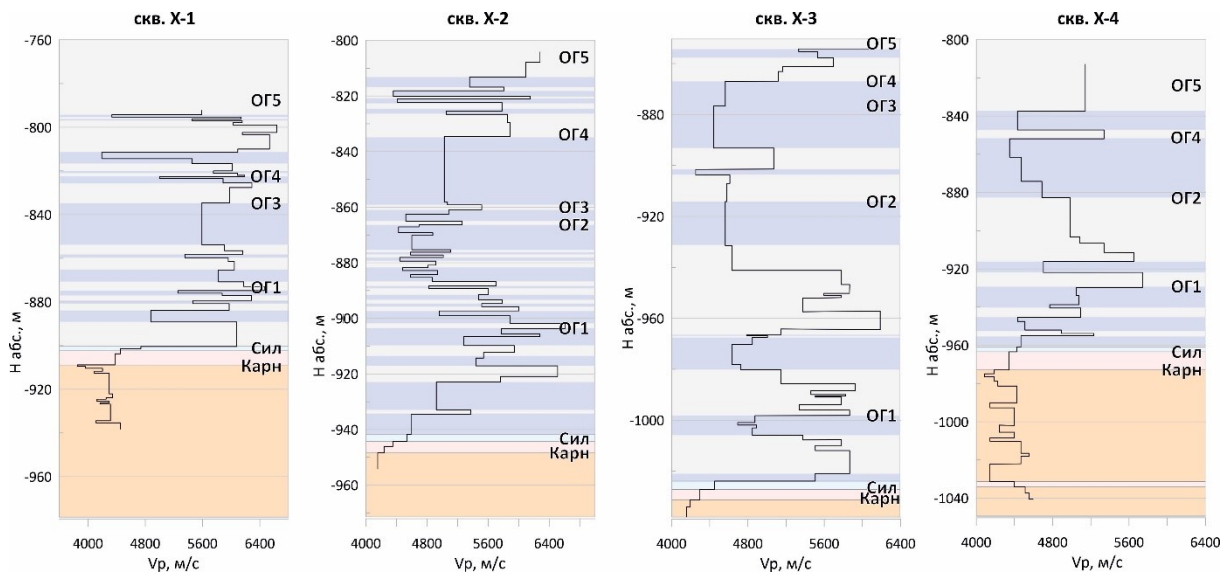


Рис. 4. Пример скоростных моделей для скважин X-1 – X-4, полученных по методикам Faust L.Y и Н.З.Залаява

Посредством эмпирических подходов Rock Physics на участке работ спрогнозированы скоростные характеристики разреза в скважинах, участвующих в сейсмостратиграфической привязке отложений. Пример полученных скоростных диаграмм представлен на рисунке 4.

Одномерное сейсмоакустическое моделирование осуществлялось в пакете Tesseral Engineering [8] с параметрами систем наблюдений реальных шахтных сейсмоакустических исследований. В качестве источника колебаний выбран точечный вертикально направленный, форма импульса принята как минимально-фазовая с преобладающей частотой в 800 Гц. Детализация тонкослоистой пластовой модели по ГИС ограничена разбиением на пласты до 2 метров, что обусловлено разрешающей способностью шахтных сейсморазведочных работ в 1,5-2 метра. Шаг дискретизации выбран 0,1 мс, а длина записи установлена 60 мс для Р-волн. Априорной информацией для расчета сейсмоакустической модели послужили синтезированные кривые АК и данные ГГК-п. Результаты расчетов одномерного моделирования показаны на примере скважины X-2 на рисунке 5.

Как видно из результатов сейсмоакустического моделирования и спрогнозированных скоростных диаграмм скважин, разрез кунгурских отложений характеризуется нестабильностью акустических характеристик вдоль геологических границ. Наблюдаемые по данным сейсмоакустического моделирования контрастные акустические границы достаточно уверенно выделяются и прослеживаются на временных разрезах по динамическим особенностям волновой картины. В связи с сильной латеральной изменчивостью по разрезу, несовпадением физических и литолого-стратиграфических границ, а также со значительной удаленностью моделируемых скважин наблюдаются допустимые временные расхождения геологических границ по данным сейсмоакустического моделирования и данным шахтных сейсмоакустических исследований.

Заключение

Эмпирические подходы Rock Physics для прогноза физических характеристик становятся все более популярными при анализе и прогнозе петроупругих данных. Эмпирические зависимости отличаются наиболее доступным набором данных и сравнительно простой методикой синтеза кривых.

Данные подходы имеют ряд ограничений при работе с эвапоритовым разрезом. Уравнение Faust L.Y для интервалов доломитовых и ангидритовых пород следует применять с определенной долей условности, поскольку нестабильные связи между параметрами могут повлиять на корректность расчетных кривых. Уравнение Н.З. Заляева подвержено влиянию технических факторов – стальной колонны скважины, поэтому важно контролировать этот фактор при проведении расчетов, чтобы не допустить переноса ошибок измерений.

Полученные кривые АК в целом соответствуют реальным. Фактическая кривая и расчетные кривые совпали между собой и легли в общий скоростной тренд. Однако эмпирические методы синтеза кривых АК, в отличие от более сложных теоретических подходов, не учитывают объемную петрофизическую модель среды – характеристики скелета породы, заполнителя и имеющегося пустотного пространства, и как следствие вносят погрешности в получение результатов. Так, например, в интервалах размыва ствола скважины даже при приемлемом совпадении фактических и синтетических кривых они содержат ошибки.

Результаты верификации уравнений показали, что необходимо критически относиться к использованию эмпирических зависимостей, описывающих связь независимых физических параметров геологического разреза. Полученные результаты сейсмо-

акустического моделирования являются исходной информацией для процедур скоростного анализа при обработке шахтных сейсмоакустических данных.

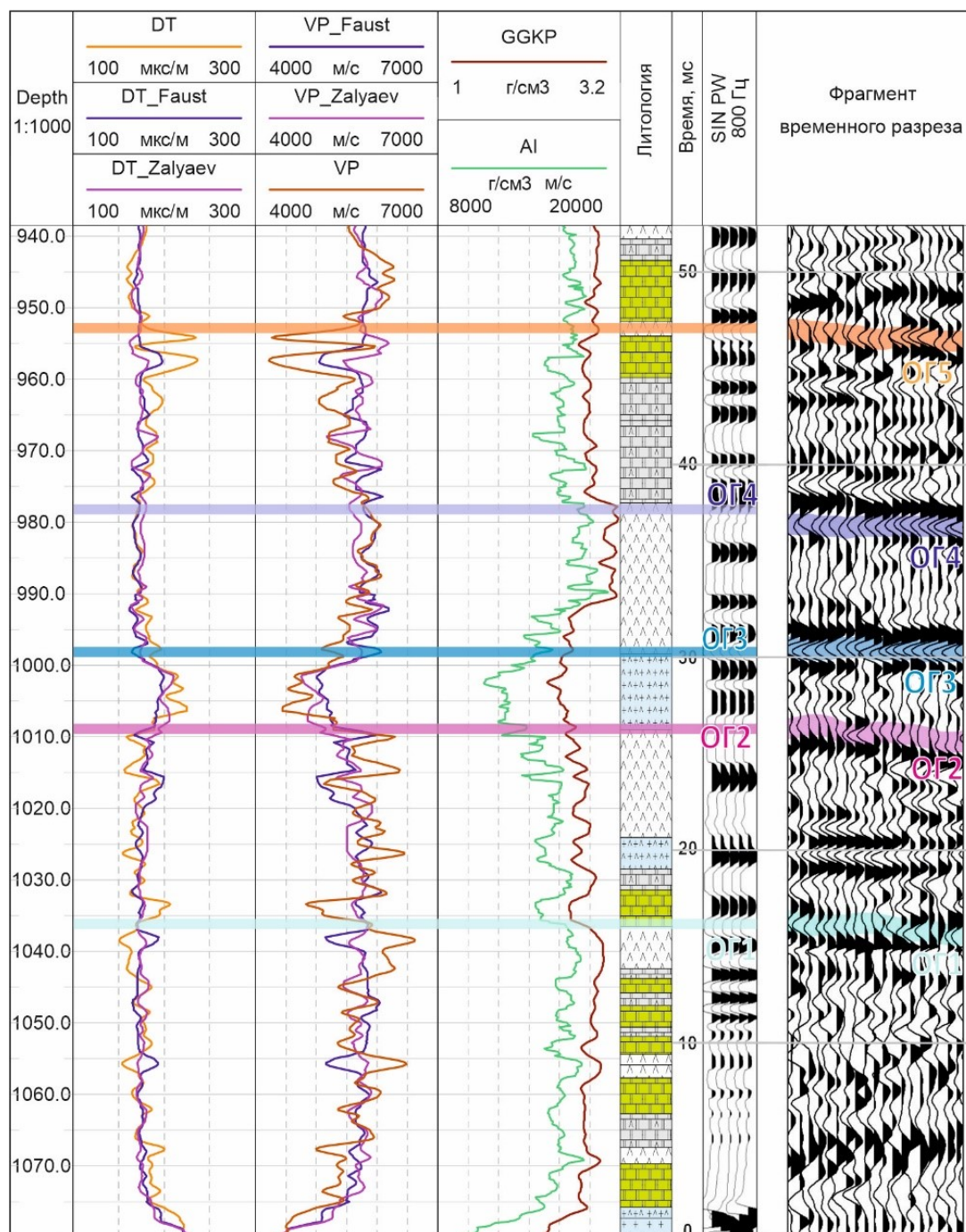


Рис. 5. Пример результата одномерного моделирования по скважине X-2

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook. – Cambridge University Press, 2009. – 525 с.
2. Хилтерман Ф. Д. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. – Тверь: ГЕРС, 2010. – 256 с.

3. Faust L.Y. Seismic velocity as a function of depth and geologic time // *Geophysics*. – 1951. – V. 16, № 2. – P. 192-206.
4. Faust L.Y. A velocity function including lithologic variations // *Geophysics*. – 1953. – V. 18. – P 271-287.
5. Заляев Н.З. Методика автоматизированной интерпретации геофизических исследований скважин. – Минск.: Университетское, 1990. – 142 с.: ил.
6. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: ОИГГМ. – 1997. – 299 с.: ил.
7. Сейсмическая стратиграфия. В 2-х ч. / под ред. Ч. Пейтона. – М.: Мир. 1982. – 374 с.: ил.
8. Tesserat Engineering. Многопараметрическая числовая среда для сейсмического моделирования, обработки, QC, планирования и интерпретации. Руководство пользователя. – Текст электронный. – URL: <http://www.tesserat-geo.com/documentation/ru/general/ProductsOfTesseratTechnologies-ru.pdf>. (дата обращения 12.10.2021).

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2021.3.13

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНОГО УЧАСТКА ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ МЕТОДОМ МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

А.В. Чугаев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Сейсморазведочный мониторинг потенциально-опасных участков на проработанной территории Верхнекамского месторождения калийных солей дополнен изучением попутно регистрируемых поверхностных волн Релея. Получены скоростные карты и вертикальные разрезы приповерхностной части массива на разных этапах мониторинга. С помощью статистического анализа скоростных характеристик выделен участок наибольшего изменения скоростей во времени. Данный участок пространственно совпадает с зоной наибольшей латеральной изменчивости скоростной характеристики в верхней части разреза. Совместная интерпретация результатов обработки поверхностных и отраженных волн указывает на наличие на указанном участке негативных техногенно-геологических процессов.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, сейсморазведка, мониторинг, поверхностные волны, многоканальный анализ поверхностных волн.

Введение

На Верхнекамском месторождении калийных солей выделен ряд потенциально опасных участков, на которых ведутся режимные сейсмические наблюдения. Один из основных методов исследования – малоглубинная 2D сейсморазведка по методике многократных перекрытий [Санфиоров, 2013]. При таких наблюдениях стандартной практикой является дополнительное изучение содержащихся в волновом поле поверхностных волн Релея по методике MASW (многоканальный анализ поверхностных волн) [Чугаев, 2012]. Методика MASW позволяет получать приповерхностную характеристику разреза для поперечных волн на глубину не менее половины длины поверхностной волны [Park, 1999; Xia, 1999, Park, 2002; Lin, Lin, 2019; Park, 2020]. Для типичных условий возбуждения и регистрации сигнала на рассматриваемой территории максимальная глубина исследований составляет 30 м [Чугаев 2012].

Методика MASW включает следующие этапы: препроцессинг данных, расчет спектрально-временных распределений по каждой сейсмограмме, прослеживание дисперсионных кривых на спектрально-временном распределении, инверсия каждой кривой для получения одномерного разреза по одной сейсмограмме, построение сводного разреза по всему профилю. Разрез по одной сейсмограмме пространственно относится к