

3. Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки для подсчета запасов углеводородов в условиях карбонатных пород с пористостью трещинно-кавернового типа / Левянт В.Б. [и др.]; ОАО «ЦГЭ». – М., 2010. – 249 с.: ил.
4. Спасский Б.А., Герасимова И. Ю. Сейсмостратиграфия: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2007. – 245 с.: ил.
5. Семерикова И.И. Методика распознавания трещиноватых сред в полях отраженных волн для прогноза коллекторов углеводородов // Экспозиция Нефть Газ. – 2015. – № 6 (45). – С. 44-48.
6. Semerikova I.I., Evans J.R., Booth D.C., Dai H., Blinova T.S. A new technique for recognizing fractured zones in P-P reflection fields, applied to the study of a North Sea oil reservoir. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2012. – V. 12, № 5. October. – DOI: 10.2202012ES000523.
7. Semerikova I.I. Technique for Recognizing of Fractured Zones Based on the Analysis of Amplitude and Frequency Attributes of the P-P Reflections // 74th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2012 Incorporating SPE EUROPEC 2012: Responsibly Securing Natural Resources. – Copenhagen, Denmark, 2012. – W044.
8. Semerikova I. Studies of the spectral characteristics of reflected seismic waves recorded in earth with scattering heterogeneity // Geomodel 2019 – 21st Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. – Gelendzhik, 2019. – DOI: 10.3997/2214-4609.201950144.

УДК 550.832.4

DOI:10.7242/echo.2022.4.16

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПРОГНОЗ УПРУГИХ СВОЙСТВ СОЛЯНОЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ТЮБЕГАТАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА СУЩЕСТВУЮЩЕМ УРОВНЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

А.Б. Трапезникова, А.В. Нежданов  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В рамках работы выполнен пространственный прогноз упругих свойств соляной части разреза Тюбегатанского месторождения калийных солей по имеющимся материалам. По результатам прогноза упругих свойств и геологической информации локализованы прогнозируемые по особенностям геологического строения и распределения физических свойств аномальные зоны.

При формировании модели учитывались геолого-геофизические данные, полученные при разведке месторождения и его последующей эксплуатации, которые в основном включали результаты геофизических исследований скважин, геологического опробования и физико-механические исследования.

**Ключевые слова:** геофизические исследования скважин (ГИС), прогноз упругих свойств, уравнение Гарднера-Канстаньи.

### Введение

В тектоническом отношении Тюбегатанское месторождение калийных солей расположено в юго-западных отрогах Гиссарского хребта, являющегося юго-западным ответвлением Тянь-Шаньской горной системы.

В геологическом строении месторождения принимают участие осадочные породы юрской, меловой, неогеновой и четвертичной систем. Продуктивные отложения относятся к галитовой подсвете гаурдакской свиты титонского яруса. В пределах центральной части месторождения отложения галитовой подсветы не обнажаются, но вскрыты скважинами на всей площади месторождения. Галитовая подсвета делится на нижнюю (некалиеносную) и верхнюю (калиеносную) пачки. Нижняя пачка делится на два горизонта. Нижний горизонт сложен светло- и темно-серой каменной солью. Верхний горизонт сложен розовой крупнокристаллической каменной солью с включениями и прожилками ангидрита и карбонатной глины.

Верхняя пачка представлена чередованием розовой и темно-розовой каменной соли с пластами и линзами сильвинита, карбонатно-глинистой каменной соли и ангидрита.

Геофизические исследования скважин (ГИС) проводились практически во всех солеразведочных скважинах месторождения. Материалы ГИС в основном представлены стандартным комплексом ГИС (ГК, КВ, КС, ПС, редко с НГК). Практически все скважины месторождения литологически охарактеризованы керновым материалом.

В рамках физико-механических исследований проведены испытания прочностных и упругих свойств пород соляной части разреза, в том числе и сильвинитов из продуктивного пласта. Объем физико-механических исследований носит ограниченный характер. Основной объем физико-механических исследований проведен в интервале соляной части разреза.

На основании архивных материалов геофизических исследований скважин и результатов физико-механических испытаний спрогнозированы упругие характеристики породного массива. В связи с отсутствием методов каротажа, дающих прямую информацию о плотности и скорости исследуемого разреза, прогноз упругих характеристик выполнялся на основании эмпирических зависимостей. В качестве опорного материала для прогноза локальной упругой модели разреза использовались данные физико-механических исследований пород [1-3] и скоростные характеристики породного массива, полученные по сейсморазведочным данным на участке первоочередной отработки [4]. В рамках обработки данных ГИС выполнены процедуры корректировки, увязки и нормировки полученных данных на опорные скважины. В качестве опорных выбраны скважины с наиболее высоким качеством каротажного материала, а так же с наличием результатов физико-механических исследований.

### Методика расчета прогнозных упругих свойств

Ввиду отсутствия в имеющемся комплексе ГИС прямых методов исследования упругих свойств пород в рамках исследования применялись эмпирические зависимости между петрофизическими параметрами и упругими свойствами пород. Для построения зависимостей использованы данные 206 образцов, включая образцы из керна солеразведочных скважин и образцы монолитов. На основе материалов физико-механических исследований сформированы зависимости плотности от коэффициента Пуассона и плотности от отношения  $V_p / V_s$  (Рис. 2а). Полученные зависимости использовались в качестве контрольных при прогнозе упругих свойств по скважинным данным.

Для прогноза плотности каменной соли и сильвинита построена зависимость (Рис. 1) между разностным петрофизическим параметром  $\Delta\gamma$  вычисляемым по данным ГК и плотностью горных пород по данным физико-механических исследований [5]. Расчет параметра  $\Delta\gamma$  производился по следующей формуле (1):

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta\gamma - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}, \quad (1)$$

где  $\Delta\gamma$  – значение ГК напротив пласта, а  $\Delta\gamma_{min}$  и  $\Delta\gamma_{max}$  – максимальные и минимальные значения в разрезе напротив опорных пластов. За  $\Delta\gamma_{max}$  в соляной части разреза принимался пласт наиболее чистого сильвинита,  $\Delta\gamma_{min}$  – пласты наиболее чистых ангидрита или каменной соли.

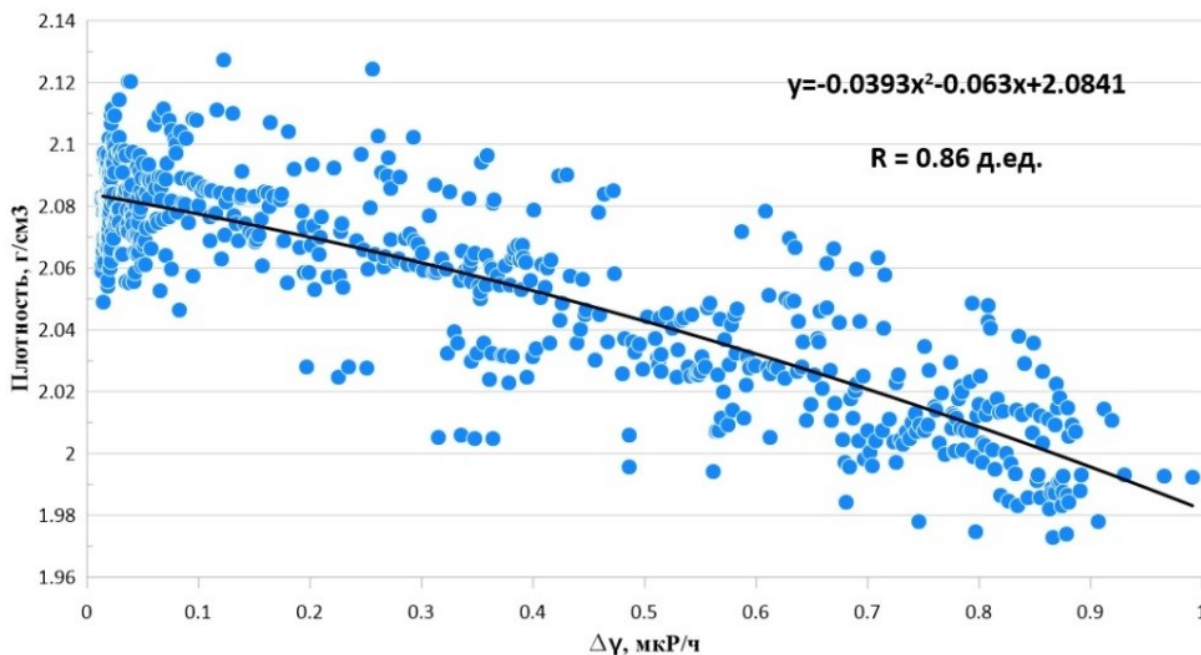


Рис. 1. Зависимость плотности от параметра  $\Delta\gamma$

Расчет параметра  $\Delta\gamma$  позволил уменьшить влияние различных факторов на результирующую кривую. Высокая корреляционная зависимость ( $R > 80\%$ ) плотности от параметра  $\Delta\gamma$  характеризуется обратной связью между радиоактивностью солей и их плотностью (без учета исключений) [6]. Таким образом, уменьшение плотности пород в соляной части разреза закономерно связано с увеличением содержания сильвина и пелитовой составляющей в породе, что, в свою очередь, приводит к повышению общего радиационного фона породы. В целях контроля и корректировки полученных значений, результаты дополнительно сопоставлялись со справочными материалам [7].

На основании полученных плотностных характеристик пород спрогнозированы скорости продольных волн посредством зависимости Гарднера-Канстаньи  $VP = f(\sigma)$  (2) для различных типов пород [7-9]:

$$VP = a\sigma^2 + b\sigma + c, \quad (2)$$

где  $VP$  – скорость продольных волн,  $\sigma$  – плотность горных пород,  $a$ ,  $b$  и  $c$  – константы, подбираемые для каждого литотипа отдельно.

Прогнозные значения скорости продольной волны контролировались информацией о скоростных характеристиках разреза, полученных при выполнении сейсморазведочных работ ГИ Уро РАН в 2014 году [4], а также коэффициентом Пуассона и отношением  $VP/VS$  для конкретных литотипов пород по результатам физико-механических исследований и справочным материалам (Рис. 2а).

На основе результатов полученных прогнозных данных построены зависимости плотности от коэффициента Пуассона и распределения параметров  $VP/VS$  (Рис. 2б). Как видно из графиков, полученные прогнозные по скважинным данным упругие параметры в среднем завышены на 7-15% от значений, полученных в результатах лабораторных исследований (Рис. 2а). Завышение значений обусловлено допустимым расхождением между динамическими параметрами прогноза по данным ГИС и статическими параметрами по данным лабораторных исследований физико-механических свойств. Стоит отметить, что такие упругие параметры, как коэффициент Пуассона статический и динамический для многих типов пород и в случае многих пластовых

условий, просто не имеют хорошей корреляционной зависимости. В рамках данного исследования ввиду отсутствия релевантной выборки по статическим параметрам и отсутствия прямых измерений динамических упругих свойств прогноз по эмпирическим зависимостям является единственно возможным.

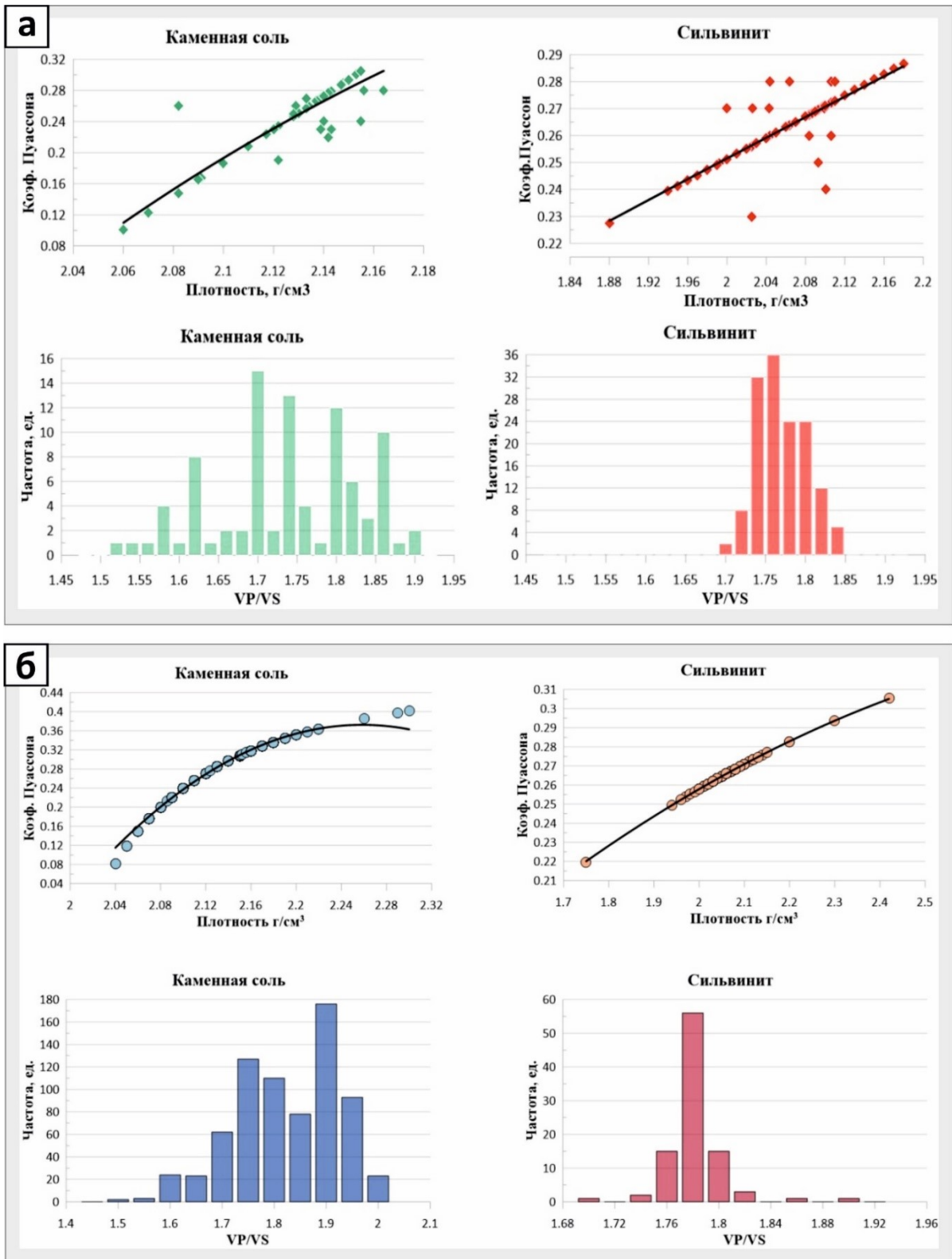


Рис. 2. а) Соотношения упругих свойств соляных пород по данным физико-механических исследований  
 б) Соотношения упругих свойств соляных пород по прогнозным данным

Тюбегатанское месторождение калийных солей

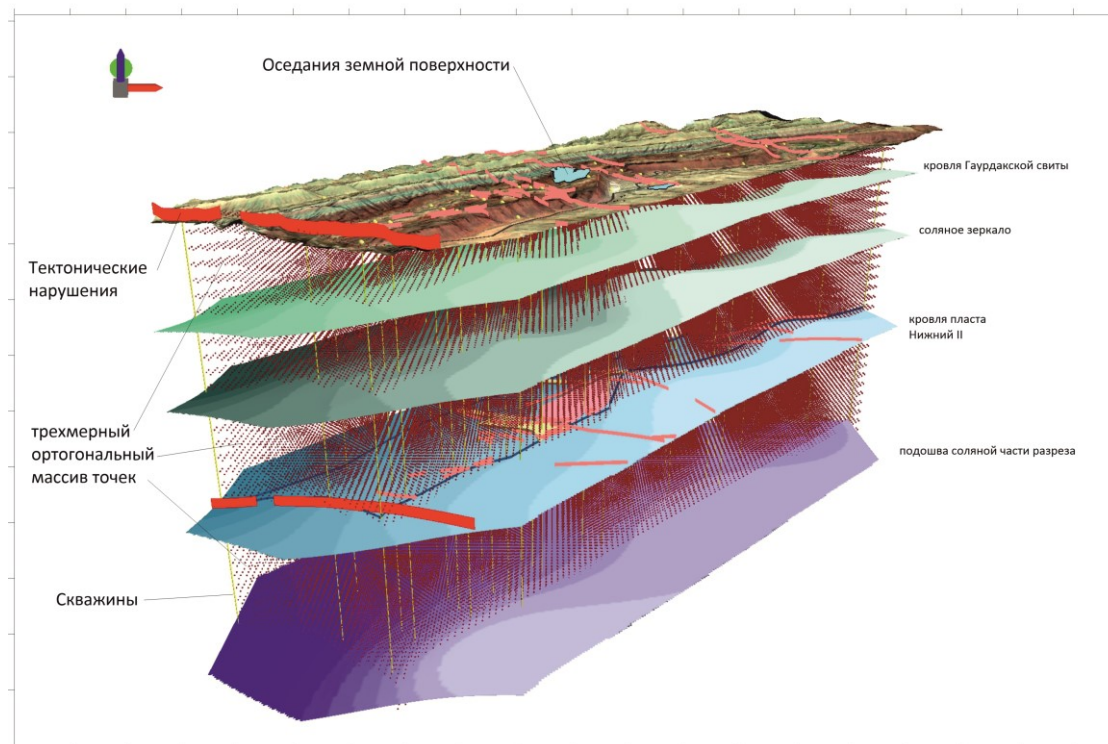


Рис. 3. Модель распространения упругих свойств, представленная в виде трехмерного массива точек

Тюбегатанское месторождение калийных солей

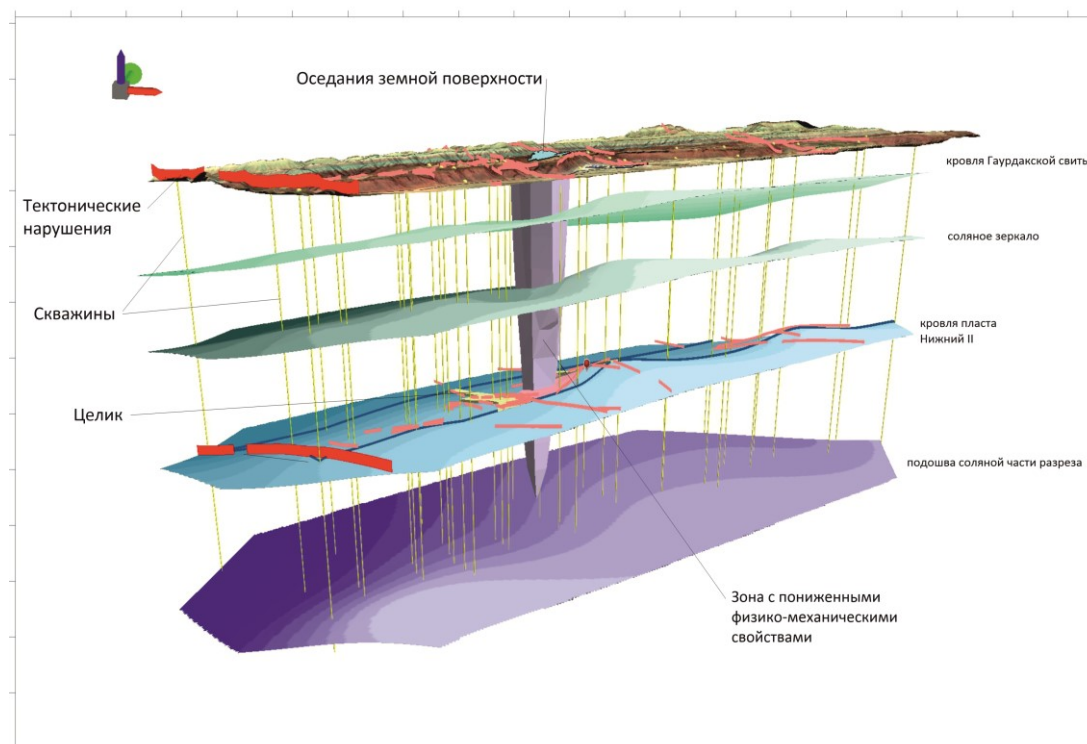


Рис. 4. Объемная модель распределений зон с пониженными упругими свойствами

### Пространственный прогноз и анализ упругих свойств

Прогнозные значения плотности и скорости продольных волн позволяют дать предварительную региональную оценку распределения упругих свойств на месторождении (Рис. 3). Участок соляной части разреза между поверхностью соляного зеркала и кровлей продуктивного интервала (Нижний II). Средние пластовые значения продольной скорости для эвапоритовых пород интервала составляют порядка 4585 м/с, средние значения плотности равны 2.17 г/см<sup>3</sup>.

Интервал продуктивного пласта характеризуется средними пластовыми значениями скорости порядка 4385 м/с при средней плотности 2.08 г/см<sup>3</sup>. Повышенные значения упругих свойств отмечаются в скважинах, имеющих многослойное строение продуктивного пласта за счет наличия каменной соли в междупластье.

Интервал ограничен подошвой продуктивного пласта и подошвой соляной подсвиты гаурдаской свиты (кровля ангидритовой подсвиты). Для данной части разреза средняя скорость по прогнозным данным составляет 4676 м/с при средней плотности 2,14 г/см<sup>3</sup>. В литологическом плане интервал представлен преимущественно каменной солью с редкими пропластками ангидрита.

Для оценки и локализации предполагаемых зон пониженных упругих свойств породного массива построены пространственные закономерности структурно-физических параметров. На рисунках 3 и 4 представлена пространственная модель распределения прогнозных скоростей распространения продольных волн и прогнозной плотности.

На основе построенной ранее структурно-каркасной модели выполнена объемная интерполяция упругих свойств по разрезу месторождения. С помощью математических операций из разрозненных точек создана однородная решетка, куб точек (Рис. 3). Данный тип решетки используется для создания объемных моделей. Равномерная решетка представляет собой трехмерный ортогональный массив точек данных, равномерно расположенных в каждом направлении.

На следующем этапе построения прогнозной модели выполнена интерполяция значений ранее рассчитанного облака точек (Рис. 4).

По результатам объемной интерполяции распределения упругих свойств выделяется две зоны относительно пониженных значений. Аномальные зоны характеризуются уменьшением скорости продольных волн на 23-25% и плотности на 10-12% относительно общего тренда распределения по разрезу. Согласно геологической информации, данные зоны с пониженными упругими свойствами характеризуются нормальным структурным строением с локальной структурно-дислоцированностью, вызванной осложнениями дизъюнктивного типа. Выделенные аномальные зоны по данным пространственного прогноза коррелируются с результатами анализа по другим методам, а также с априорной структурно-геологической информацией о районе исследования.

### Заключение

На основании архивных материалов геофизических исследований скважин и результатов физико-механических исследований выполнен прогноз упругих характеристик породного массива соляной части разреза Тюбегатанского месторождения. Прогноз выполнен с использованием эмпирических зависимостей плотности от параметра гамма  $\sigma = f(\Delta\gamma)$  и уравнения Гарднера-Канстаньи  $VP = f(\sigma)$ .

На основе построенной ранее структурно-каркасной модели выполнен прогноз упругих свойств по разрезу месторождения. По результатам прогноза в распределении упругих свойств выделены две аномальные зоны относительно пониженных значений.

Аномальные зоны характеризуются уменьшением скорости продольных волн на 23-25% и плотности на 10-12% относительно общего тренда распределения по разрезу.

Выделенные по прогнозу распределения упругих свойств аномальные зоны подтверждаются данными других методов и априорной геологической информацией. Коррелируемость результатов прогнозов по разным методам дает возможность сделать заключение о применимости описанного в работе подхода к прогнозу упругих свойств ввиду отсутствия достаточного объема информации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О результатах геологоразведочных работ, проведенных на Тюбегатанском месторождении калийных и калийных солей в 1959-65 гг. (с подсчетом запасов калийных солей по состоянию на 1.1.1966 г.): Отчет / Самаркандский комплексный геологоразведочный трест. Кашкардарьинская геологоразв. экспедиция; Мальцев А.М., Потрац А.И., Чабаненко В.В. [и др.]. – Китаб, 1965.
2. Геомеханические исходные данные для проектирования отработки Тюбегатанского месторождения калийных солей: отчет о НИР / ОАО «Галургия» – Пермь, 2008.
3. Заключение об исследованиях физико-механических свойств пород промышленного пласта и вмещающих пород Тюбегатанского месторождения калийных полей: этап 1, по договору № 334Д/2010 / ОАО «Галургия»; Марakov В.Е., Клепизонова И.Г. [и др.]. – Березники, 2010.
4. Шахтные высокоразрешающие сейсморазведочные исследования в пределах шахтного поля рудника Дехканабадского завода калийных удобрений: отчет по договору № 86/2013 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – 75 с.
5. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 449 p.
6. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. – М.: Госгиптехиздат, 1955. – 492 с.
7. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics: handbook. – Cambridge University Press, 2009. – 525 с.
8. Хилгерман Ф. Д. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. – Тверь: ГЕРС, 2010. – 256 с.
9. Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics – 1974. – V. 39, № 6. – С.770 – 780. – DOI: 10.1190/1.1440465.

УДК 550.834.05

DOI:10.7242/echo.2022.4.17

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА УВЛАЖНЕНИЯ В ШАХТНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

К.Б. Фатькин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Показан опыт использования сейсмоакустических исследований во внутренних точках среды для обнаружения областей увлажнения. В комплексе обработки и интерпретации полученных данных применена методика анализа изменения удалений отраженной волны с удалением источника-приемник.

**Ключевые слова:** шахтная сейсмоакустика, зоны трещиноватости и разуплотнения, флюидонасыщение, динамический анализ, дистанционный прогноз, отраженные волны.

В работе представлены результаты цифровой обработки и интерпретации сейсмоакустических данных, полученных в подземной выработке на месторождении калийных солей. В решаемые задачи входили изучение строения и состояния породного массива, а также поиск и локализация участков с признаками увлажнения. Для этого проведены сейсмоакустические исследования в шахтных условиях по методике многократных перекрытий. Параметры систем регистрации определены