УДК 553.632:550.834

РАЗВИТИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

И. А. САНФИРОВ[1], *директор, проф., д-р техн. наук, sanf@mi-perm.ru*

А. А. ЖИКИН[1], *младший научный сотрудник*

Р. А. БОГДАНОВ[2], *руководитель направления по ликвидации рудника*

К. Б. ФАТЬКИН[1], *научный сотрудник, канд. техн. наук*

[1] *Горный институт УрО РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия*
[2] *ПАО «Уралкалий», Березники, Россия*

По результатам исследований в пределах калийной залежи сформирован набор основных параметров интерпретационного этапа сейсморазведочных исследований. В рамках развития качественной интерпретации рассмотрен анализ нерегулярной составляющей волнового поля в результатах обработки по рассеянным волнам, спектральной декомпозиции и RGB-смешивания. Предложен метод для определения возможной трещиноватости массива на основе изменчивости интервальных скоростей, позволяющий в совокупности с данными AVO-анализа оценить динамику дезинтеграции пород в пределах аварийных объектов.

Ключевые слова: *малоглубинная 2D- и 3D-сейсморазведка, рассеянные волны, спектральная декомпозиция, RGB-смешивание, AVO-анализ.*

DOI: *10.17580/gzh.2021.04.03*

Введение

Горные работы на месторождениях водорастворимых полезных ископаемых регламентируются определенными технологическими требованиями, обеспечивающими защиту горных выработок от затопления. В подобных условиях основная задача геофизических исследований – выявление и изучение особенностей строения и свойств водозащитной и продуктивной толщ и их реакции на конкретную горнотехническую ситуацию.

Общеизвестно, что из всех методов разведочной геофизики сейсморазведка выделяется «богатым» информационным содержанием регистрируемых данных. Уже в исходных данных, наряду с прямой фиксацией времени регистрации отражения или прохождения изучаемых упругих волн, содержится информация об амплитудах и частотном составе. Последующая цифровая обработка направлена на выделение конкретных типов и видов волн и обеспечение возможности получения их различных кинематических и динамических параметров.

Стандартный информационный набор интерпретационного этапа при сейсморазведочных исследованиях водозащитной и продуктивной толщ как на поверхности, так и во внутренних точках среды до последнего времени [1–4] включал: времена целевых отражений, эффективные и интервальные скорости, амплитуды, частоты, распределения комплексного параметра. Подобный набор параметров позволяет на уровне экспертных оценок формировать интерпретационные заключения о природе выявляемых осложнений волнового поля. Данные заключения базируются на количественных и качественных оценках изменчивости волнового поля.

Цель качественных заключений – пространственная локализация физико-геологических неоднородностей и возможная оценка их природы. Совместное проявление сейсморазведочных параметров – амплитуд, когерентности и частоты формирует некий волновой «образ», который соответствует модели предполагаемой неоднородности. Подобный анализ лежит в основе сейсмостратиграфических подходов к интерпретации сейсморазведочных данных, хорошо известных из нефтяной сейсморазведки [5, 6]. Очевидно, что при решении горнотехнических задач наборы интерпретационных моделей существенно отличаются от используемых при поисках и разведке залежей углеводородов.

Методика и результаты исследований

В процессе развития сейсморазведочных исследований на Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей (ВКМКС) сформировано несколько типовых волновых «образов» для разного рода неоднородностей водозащитной и продуктивной толщ. Резкое изменение гипсометрии прослеживаемых отражающих горизонтов при наличии контрастных амплитудных

аномалий предполагает влияние складчатости с периодом, меньшим зоны Френеля. Совместно проявляющиеся отклонения от фоновых значений амплитуд и скоростей распространения упругих волн могут свидетельствовать о литологической природе выделяемых осложнений, например участки резкой литофациальной изменчивости водозащитной толщи (ВЗТ).

Изменения в частотном составе результирующих волновых картин при соответствующей гипсометрии отражающих горизонтов рассматривают как индикаторы участков переменной мощности, в пределах которых возможно и полное выклинивание отдельных литологических комплексов.

Конечная цель количественной интерпретации заключается в построении сейсмогеологических моделей, характеризующихся определенными размерами и упругими свойствами, представленными в значениях глубин отражающих границ и скоростей распространения упругих волн в интервалах между ними. Контрастность изменений структурно-физических свойств моделей учитывают в последующих геомеханических обоснованиях безопасного ведения горных работ. Кроме того, оценка временной изменчивости интервальных скоростей по результатам мониторинговых наблюдений с учетом горнотехнической ситуации позволяет судить о техногенной составляющей регистрируемых волновых полей [7].

Практика сейсморазведочных исследований на ВКМКС [1, 7–13] и решение разного рода задач при мониторинге аварийных участков [14] обусловили необходимость включения в интерпретационный набор дополнительных оценок составляющих волнового поля. В рамках развития этапа качественной интерпретации данные оценки в основном направлены на анализ нерегулярной части волнового поля и включают: интенсивность рассеянных волн, спектральную декомпозицию, RGB-смешивание.

При изучении рассеянных волн обычно применяют узкополосный фильтр высокой частоты в сочетании с «жесткой» когерентной фильтрацией и последующим пространственно-временным сглаживанием в результате использования миграционных процедур. Подобные процедуры позволяют картировать контрастные литологические неоднородности с непараллельными отражающими границами в плоскости изучения. Результаты миграционного преобразования суммарного волнового поля рассеянных волн, по данным шахтных сейсмоакустических наблюдений с целью оконтуривания зоны замещения в продуктивном пласте калийных солей, представлены на **рис. 1**.

Направления развития количественной интерпретации связаны с переводом параметров волнового поля в структурно-формационные параметры породного массива. Данный процесс основан на изучении как кинематических, так и динамических параметров отраженных волн, регистрируемых в интервале малых глубин.

Обоснован прямой пересчет изменчивости значений интервальных скоростей в объемы возможной трещиноватости породного массива. С этой целью применяют формулу средней скорости [5]. Общую мощность зоны трещиноватости h в пределах изучаемого интервала определяют по формуле

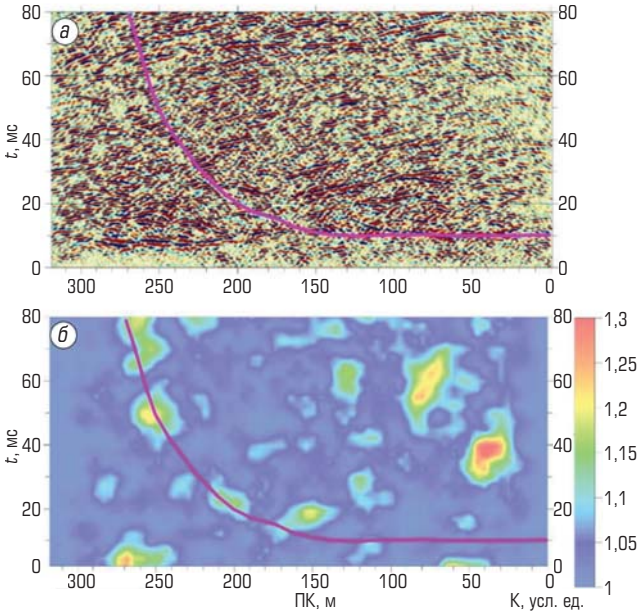

Рис. 1. Результаты цифровой обработки данных шахтных сейсмоакустических исследований:
а – миграция по рассеянным волнам; *б* – разрез комплексного параметра; цветной линией показана граница зоны замещения по результатам сейсмопросвечивания

$$h = \frac{H(V_Н - V_И)}{V_И\left(\frac{V_Н}{V_Т} - 1\right)},$$

где H – мощность интервала; $V_н$ – скорость в ненарушенных породах; $V_и$ – скорость в изучаемом интервале, $V_т$ – скорость в интервале нарушенности пород. Подобного рода пересчет можно применять при контроле эффективности мероприятий по укреплению породного массива и интегральной оценке развития негативных процессов при реализации аварийной ситуации.

По результатам цифровой обработки и интерпретации сейсморазведочных данных в пределах аварийного участка одного из калийных рудников ВКМКС на предыдущих этапах выделены зоны, связанные с процессами дезинтеграции породного массива. Они объединены в одну область, вытянутую в северо-западном направлении. Данная область была сформирована в течение всего периода наблюдений, начиная с 2014 г. и по настоящее время. В качестве примера по данным сейсморазведки представлена пространственная модель ее развития за период 2014–2020 гг. (**рис. 2**). Очевидно, расширение областей с пониженными физическими свойствами происходит за счет разуплотнения и трещинообразования, вызванных негативными гидрогеологическими процессами в районе провала и на северо-западном потенциально опасном участке.

Прогноз характера заполнения прогнозируемого объема зон трещиноватости предусмотрен в процедуре AVO (amplitude vs offset) анализа, в котором разработаны интерпретационные модели для различных закономерностей изменения амплитуд

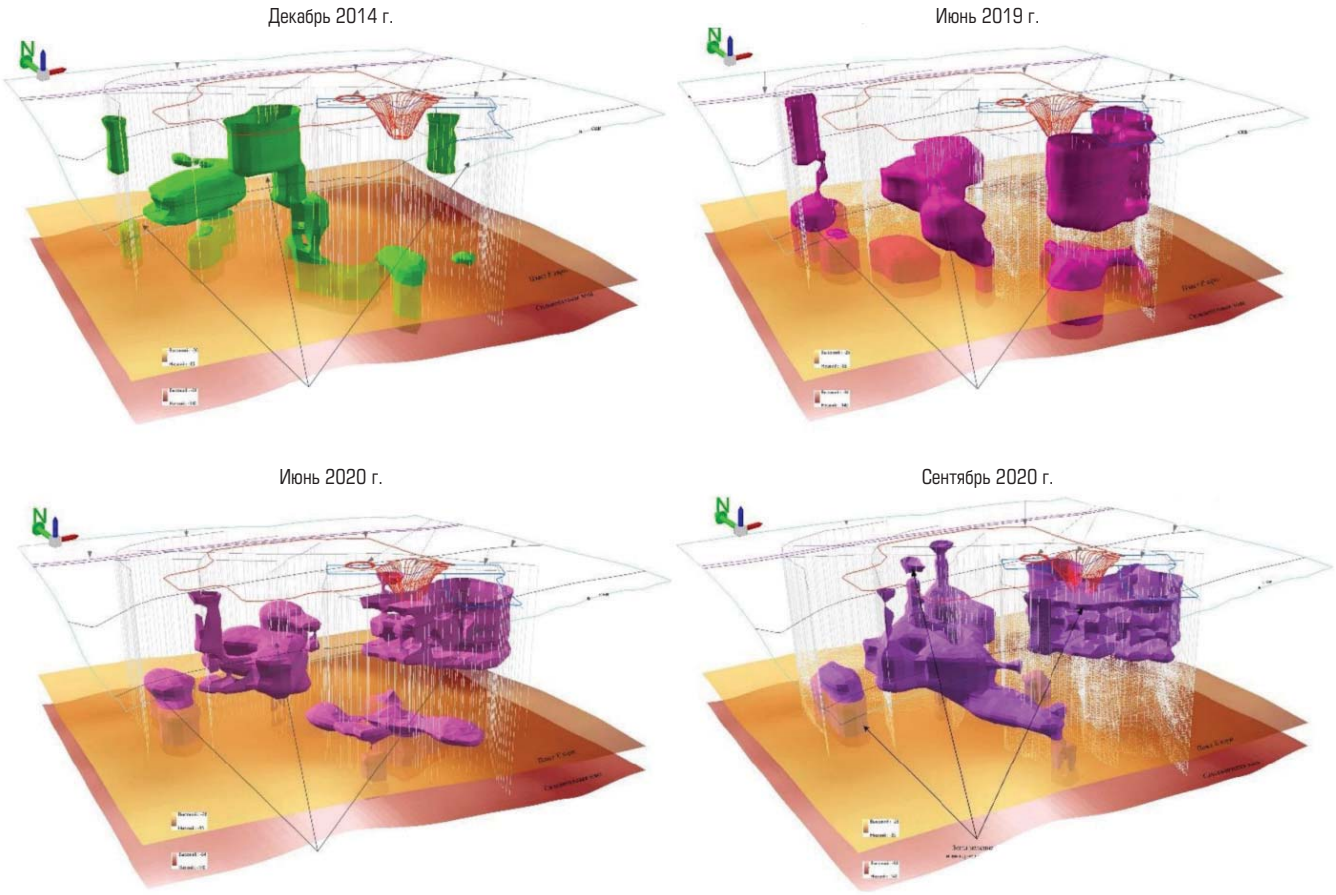

Рис. 2. Изменение состояния породного массива по сейсморазведочным данным в пределах аварийного участка ВКМКС (цветом обозначены зоны повышенного затухания амплитуд отраженных волн продольного типа в интервале глубин от 20 до 250 м)

отраженных волн в зависимости от расстояния источник-приемник, т. е. от угла падения. AVO-анализ относится к одному из видов упругой инверсии, основанному на использовании специфических коэффициентов – AVO-пересечения (intercept-A) и градиента *B* двучленной аппроксимации Шуэ [15, 16], связанных с изучением поведения коэффициента отражения продольной сейсмической волны при различных углах падения.

Изменения амплитуд возникают в зонах варьирования интегральных оценок физических свойств интервалов геологического разреза пород вследствие флюидо- или газонасыщения (пустоты). Так, для первого случая характерно преобладание положительных значений данных коэффициентов, а для второго – отрицательных. Безусловно, подобные оценки в тонкослоистых средах интервала малых глубин, где причины изменения интенсивности волнового поля обусловлены в основном интерференционными эффектами, носят экспертный и интегральный характер.

Изменения значений интервальных скоростей с учетом результатов AVO-анализа позволяют судить о динамике изменения общего объема пустоты для конкретных интервалов укрепляемого породного массива. Наибольший интерес представляют участки несогласованности изменений динамических и кинематических параметров, наличие которых может быть вызвано различным заполнением предполагаемых зон трещиноватости. Например, в пределах площади распространения пород с повышенной трещиноватостью выявлена несогласованность в распределении амплитуд отраженных волн продольного типа (**рис. 3**, *в*), снятых с временных разрезов (см. рис. 3, *а*), и интервальных скоростей распространения упругих волн. В восточной части площади работ при «сквозном» характере снижения значений интервальных скоростей повышенное затухание амплитуд отмечено только в нижней части разреза (от –350 до –500 м). На западе при «сквозном» характере затухания амплитуд пониженные значения скоростей распространения упругих волн наблюдаются только в интервале абсолютных отметок от –150 до –280 м. Для центральной части характерна промежуточная ситуация.

Преобладание незаполненного пространства усиливает контрастность дополнительных, не обусловленных литологической дифференциаций акустических границ, причем не всегда горизонтальной ориентации. В подобных средах прогнозируют повышенное рассеяние и деструктивную интерференцию отраженных волн, что соответственно и снижает оцениваемую по суммарным временным разрезам интенсивность волнового поля. При появлении какого-либо заполнения контрастность и число дополнительных границ снижаются и в динамических характеристиках они становятся менее выраженные, чем в кинематических.

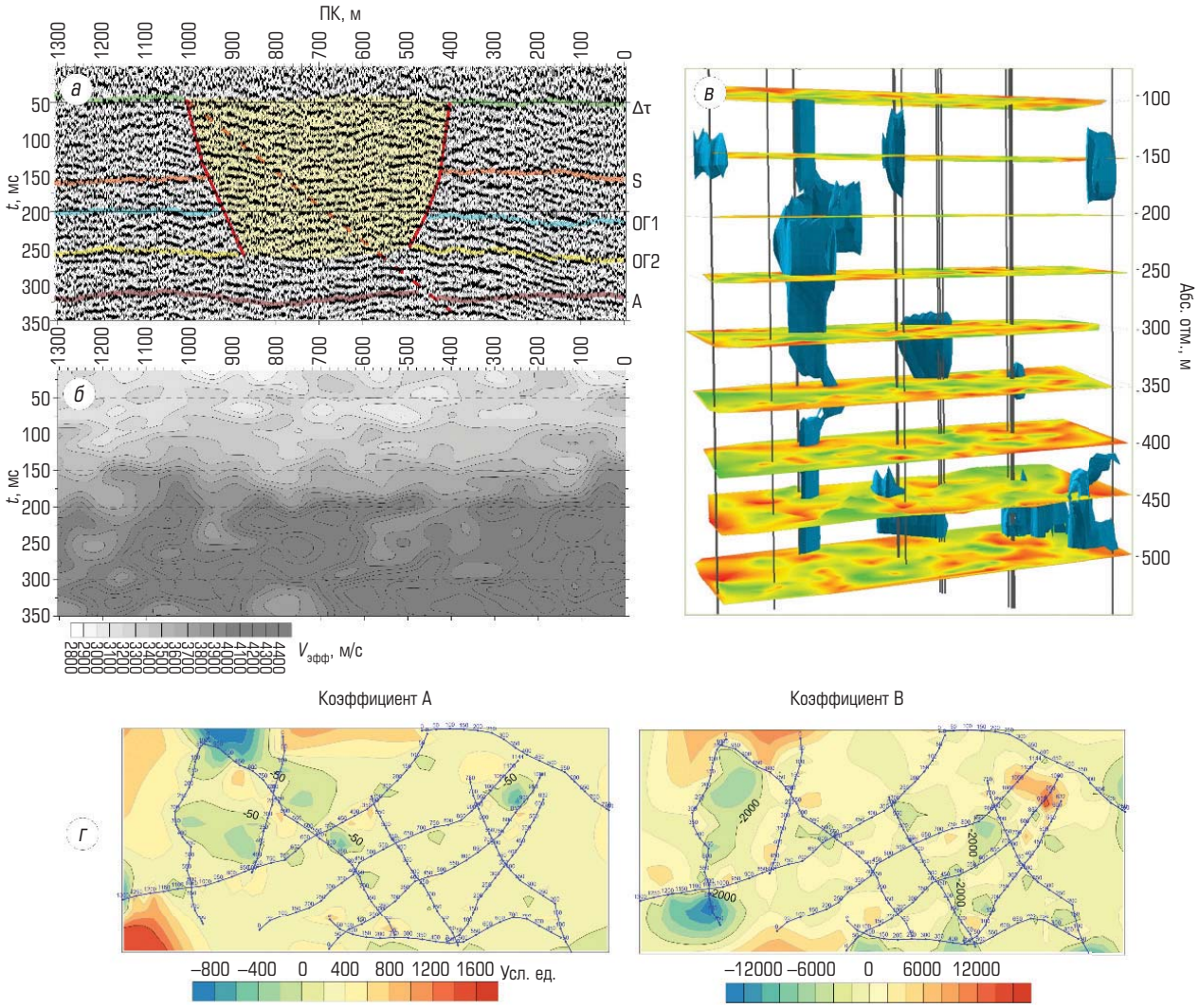

Рис. 3. Результаты малоглубинных сейсморазведочных исследований:
а – временной разрез; *б* – скоростная характеристика; *в* – распределение амплитуд отраженных волн продольного типа с выделением зон повышенного затухания; *г* – горизонтальные срезы распределения коэффициентов Шуэ *А* и *В*

Таким образом, если сравнить участки на востоке и на западе, то в распределениях значений коэффициентов (см. рис. 3, *г*) очевидно преобладание положительных оценок для востока и отрицательных для запада. Для расчета коэффициентов *А* и *В* использована система обработки сейсмических данных SPS-PC. На основании данных интерпретационных подходов можно предположить нарастание заполнения зон трещиноватости флюидами с запада на восток и снизу вверх по разрезу. Центральная часть занимает промежуточное положение.

На содержание интерпретационного этапа безусловное влияние оказывают и новые методические подходы при выполнении полевых наблюдений. При осуществлении площадных (квази-3D) и пространственных (3D) наблюдений информационное обеспечение интерпретационного этапа расширяется благодаря возможности анализа пространственных распределений сейсморазведочных параметров [10]. В основном решают задачи качественной интерпретации, связанные с локализацией объектов поиска.

Квазипространственные наблюдения организуют при отсутствии прямого доступа к изучаемым участкам: под зданиями и сооружениями, на аварийных участках. Линии приема и возбуждения упругих колебаний разносят по границам изучаемой территории. Суммирование пространственных выборок по пунктам приема (ОР), пунктам возбуждения (SP) и точкам отражения (ОГТ) позволяет конкретизировать положение аномалии образующих объектов относительно линии точек отражения.

Наблюдения 3D выполняют на участках, требующих детальных исследований. Получаемые кубы сейсмической информации характеризуются повышенной пространственной разрешенностью относительно профильных и площадных систем наблюдений, что позволяет прослеживать в амплитудных представлениях пространственные трансформации локальных литолого-структурных неоднородностей ВЗТ (**рис. 4**, *а*, *б*).

Вследствие повышенной пространственной плотности сбора сейсморазведочной информации при реализации

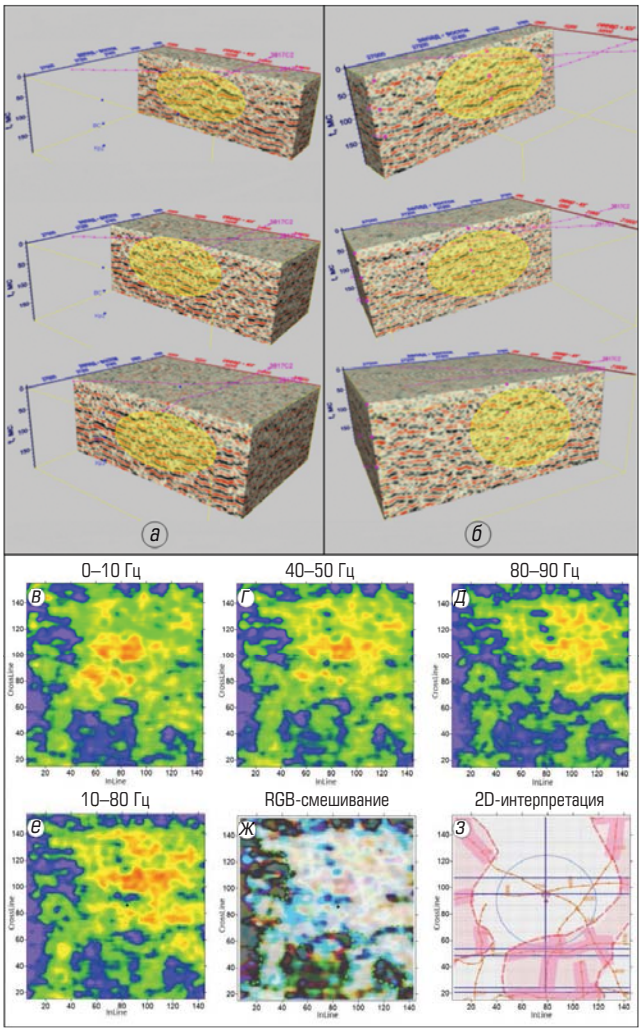

Рис. 4. Результаты обработки данных малоглубинных исследований 3D:
а – вертикальные срезы куба сейсмических данных меридионального простирания; *б* – то же, широтного простирания; *в*, *г*, *д*, *е* – среднеарифметическое значение амплитуд колебаний для отражающего горизонта СМТ в интервале частот 0–10, 40–50; 80–90 и 10–80 Гц соответственно; *ж* – RGB-смешивание; *з* – схема интерпретации данных сейсморазведки 2D

пространственных систем наблюдений большой информативностью обладают отдельные интерпретационные процедуры. К примеру, применение спектральной декомпозиции направлено на получение дополнительной информации о природе выделяемых осложнений волнового поля. Наличие отрицательных аномалий амплитуд высокочастотной составляющей с наибольшей долей вероятности связано с зонами трещиноватости и большей частью – техногенной, а положительных – с пластами переменной мощности. Для амплитуд низкочастотной составляющей основным определяющим фактором являются особенности геологического строения, характерные для всего исследуемого интервала породного массива. Спектральную декомпозицию можно применять в комплексе с процедурой цветового смешивания [11, 13, 17–20]. В простом варианте технологию спектральной RGB-декомпозиции можно представить через смешение суммарных волновых полей разных частотных компонент. Соответственно более низкочастотная компонента представлена красным, средняя – зеленым, высокая – синим цветом (см. рис. 4).

Так, например, по результатам RGB-смешивания среднеарифметических значений амплитуд колебаний для отражающего горизонта соляно-мергельной толщи (СМТ) удается более точно наметить границы аномальных участков и скорректировать результаты интерпретации площадных 2D-наблюдений (см. рис. 4, *в–з*). Кроме этого, процедура RGB-смешивания независимых атрибутов (амплитуда, сигнал/помеха, когерентность) на уровне горизонта СМТ позволила разделить природу аномальных зон, выделяемых в верхней части разреза в южной и западной частях потенциально опасного участка.

Заключение

Таким образом, развитие интерпретационного процесса сейсморазведочных исследований ВЗТ за последние тридцать лет затрагивает как качественную, так и количественную составляющие. Расширение информационного обеспечения их практической реализации обусловлено двумя взаимосвязанными процессами: расширением поисковых объектов и развитием методического инструментария для их изучения. Подобный подход типичен для развития во времени любого исследовательского процесса и, как показывают последние результаты исследований, он еще недостаточно отработан.

Библиографический список

1. *Барях А. А., Санфиров И. А., Федосеев А. К., Бабкин А. И., Цаюков А. А.* Сейсмогеомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // ФТПРПИ. 2017. № 6. С. 10–22.
2. *Байбакова Т. В.* Примеры интерпретации сейсморазведочных данных при изучении сложных геологических объектов в пределах ВКМКС // Стратегия и процессы освоения георесурсов : сб. науч. тр. – Пермь, 2018. Вып. 16. С. 224–226.
3. *Бобров В. Ю.* Необходимость проведения пространственных инженерных сейсморазведочных работ // Восемнадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике : сб. науч. матер. – Пермь : ГИ УрО РАН, 2017. С. 21–24.
4. *Бобров В. Ю., Герасимова И. Ю.* Изучение верхней части разреза методами инженерной 2Д и 3Д сейсморазведки // Инженерная и рудная геофизика 2020 : 16-я науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020». – ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ, 2020.
5. *Payton Ch. E.* Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Series: Memoir 26. 7th ed. – Tulsa : American Association of Petroleum Geologists, 1977. – 516 p.
6. *Санфиров И. А., Бабкин А. И., Ярославцев А. Г., Прийма Г. Ю., Фаткин К. Б.* Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. 2011. № 5. С. 53–58.

7. *Ярославцев А. Г.* Атрибутивный анализ данных пространственной малоглубинной сейсморазведки на потенциально-опасном участке // Стратегия и процессы освоения георесурсов : сб. науч. тр. – Пермь, 2017. Вып. 15. С. 211–213.
8. *Ярославцев А. Г.* Сейсморазведочные технологии оценки воздействия горных работ на верхнюю часть разреза : дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2003. – 152 с.
9. *Haibin Di, Dengliang Gao.* 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. Iss. 3. P. 747–761.
10. *Froner B., Purves S. J., Lowell J., Henderson J.* Perception of visual information: the role of colour in seismic interpretation // First Break. 2013. Vol. 31. Iss. 4. P. 29–34.
11. *Alcalde J., Bond C. E., Johnson G., Kloppenburg A., Ferrer O.* et al. Fault interpretation in seismic reflection data: an experiment analysing the impact of conceptual model anchoring and vertical exaggeration // Solid Earth. 2019. Vol. 10. P. 1651–1662.
12. *Öz Yilmaz*. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, And Interpretation Of Seismic Data. Vol. I, II. Series: Investigations in Geophysics No. 10. In two volumes. 2nd ed. – Tulsa : Society of Exploration Geophysicist, 2001. – 2027 p.
13. *Veeken P. C. H.* Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterisation. – Amsterdam : Elsevier, 2006. Vol. 37. – 522 p.
14. *Rutherford S. R., Williams R. H.* Amplitude-versus-offset variations in gas sands // Geophysics. 1989. Vol. 54. No. 6. P. 680–688.
15. *Sanfirov I. A., Zhikin A. A., Priima G. U., Nezhdanov A. V.* Seismic inspection of the rock mass consolidation grouting in the zone of anthropogenic accident // Engineering and Mining Geophysics 2018 : 14th Conference and Exhibition. – Almaty, 2018. Vol. 1. P. 121–128.
16. *Shuey R. T.* A simplification of the Zoepptritz equations // Geophysics. 1985. Vol. 50. No. 4. P. 609–614.
17. *Yan Ding, Qizhen Du, Liyun Fu, Shikai Jian*. Reliability analysis of seismic attribute in the detection of fault-karst // Interpretation. 2020. Vol. 8. Iss. 4. P. 61–70.
18. *Yaroslavtsev A., Bobrov V., Zhikin A.* Engineering 3D Seismic Survey on the Potash Mine Territory // Engineering Geophysics 2017 : 13th Conference and Exhibition. – Kislovodsk, 2017. P. 43–51.
19. *Yinling Guo, Suping Peng, Wenfeng Du, Dong Li*. Fault and horizon automatic interpretation by CNN: a case study of coalfield // Journal of Geophysics and Engineering. 2020. Vol. 17. Iss. 6. P. 1016–1025.
20. *Haibin Di, Dengliang Gao.* 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. Iss. 3. P. 747–761. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 28–33
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.03

Evolvement of interpretation capacities of seismic measurements in mining of water-soluble minerals

Information about authors
I. A. Sanfirov [1], Director, Professor, Doctor of Engineering Sciences, sanf@mi-perm.ru
A. A. Zhikin [1], Junior Researcher
R. A. Bogdanov [2], Mine Closure Manager
K. B. Fatkin [1], Researcher, Candidate of Engineering Sciences
[1]Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
[2]Uralkali, Berezniki, Russia

Abstract
The current development level of geophysical methods for mining monitoring of water-soluble mineral deposits provides opportunities to control the growing variety of potentially hazardous geological and mining conditions, to identify the critical states of rock mass and to monitor the emergency facilities. Seismic surveys for solving the specified problems have proven to be a highly informative method for studying the structural features and properties of productive and water-protective overburden strata, which has a high information richness of the recorded data. The main set of parameters for the interpretation stage of seismic exploration has been formed based on the experience in shallow seismic surveys within a potash deposit; it includes the target reflection times, effective and interval velocities, amplitudes, frequencies and a number of derivatives from these parameters. Improvement and adaptation of world interpretation practices in relation to the indicated seismic studies conditions provides means for increasing reliability of anomalies identification and expanding the set of typical wave 'images' for various kinds of inhomogeneities in a wide range of wave field realizations and its attributes. The analysis of irregular wave field component in the results of scattered waves processing, spectral decomposition and RGB-mixing is considered as an additional techniques of qualitative interpretation. An approach is proposed to determining possible fracturing in rock mass based on the variability of interval velocities. In combination with the AVO-analysis, this approach makes it possible to assess the trend of rock disintegration within the emergency facilities. The interpretation results of the areal (quasi-3D) and spatial (3D) detailed surveys of a shallow potash deposit are presented.
Keywords: shallow 2D and 3D seismic, scattered waves, spectral decomposition, RGB-mixing, AVO analysis.

References

1. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., Babkin A. I., Tsayukov A. A. Seismic–Geomechanical Control of Water-Impervious Strata in Potassium Mines. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, Iss. 6. pp. 981–992.
2. Baybakova T. V. Interpretation of seismic explorations of complex geological objects within the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Strategy and Processes of Georesources Management : Collection of Scientific Papers.* Perm, 2018. Vol. 16. pp. 224–226.
3. Bobrov V. Yu. Essentiality of 3D seismic surveys. *Proceedings of the 18th Ural Youth School of Geophysics.* Perm : GI UrO RAN, 2017. pp. 21–24.
4. Bobrov V. Yu., Gerasimova I. Yu. The investigation of shallow structure inhomogeneities by 2D and 3D seismic engineering techniques. *Geophysics in Engineering and Mining. The 16th Conference with Seminar on Geology in Engineering and Mining 2020*. EAGE GEOMODEL, 2020.
5. Payton Ch. E. Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Series: Memoir 26. 7th ed. Tulsa : American Association of Petroleum Geologists, 1977. 516 p.
6. Sanfirov I. A.,Babkin A. I., Yaroslavtsev A. G., Priyma G. Yu., Fatkin K. B. Seismic measurements of exploitation conditions of the potash deposit. *Geofizika*. 2011. No. 5. pp. 53–58.
7. Yaroslavtsev A. G. Attribute analysis of data of 3D shallow seismic surveys in a potentially hazardous area. *Strategy and Processes of Georesources Management : Collection of Scientific Papers*. Perm, 2017. Vol. 15. pp. 211–213.
8. Yaroslavtsev A. G. Seismic exploration technologies in assessment of mining-induced impact on the near-surface section : Dissertation . . . of Candidate of Engineering Sciences. Perm, 2003. 152 p.
9. Haibin Di, Dengliang Gao. 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization. *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174, Iss. 3. pp. 747–761.
10. Froner B., Purves S. J., Lowell J., Henderson J. Perception of visual information: the role of colour in seismic interpretation. *First Break*. 2013. Vol. 31, Iss. 4. pp. 29–34.
11. Alcalde J., Bond C. E., Johnson G., Kloppenburg A., Ferrer O. et al. Fault interpretation in seismic reflection data: an experiment analysing the impact of conceptual model anchoring and vertical exaggeration. *Solid Earth*. 2019. Vol. 10. pp. 1651–1662.
12. Öz Yilmaz. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, And Interpretation Of Seismic Data. Vol. I, II. Series: Investigations in Geophysics No. 10. In two volumes. 2nd ed. Tulsa : Society of Exploration Geophysicist, 2001. 2027 p.
13. Veeken P. C. H. Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterisation. Amsterdam : Elsevier, 2006. Vol. 37. 522 p.
14. Rutherford S. R., Williams R. H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*. 1989. Vol. 54, No. 6. pp. 680–688.
15. Sanfirov I. A., Zhikin A. A., Priima G. U., Nezhdanov A. V. Seismic inspection of the rock mass consolidation grouting in the zone of anthropogenic accident. *Engineering and Mining Geophysics 2018 : 14th Conference and Exhibition*. Almaty, 2018. Vol. 1. pp. 121–128.
16. Shuey R. T. A simplification of the Zoepptritz equations. *Geophysics*. 1985. Vol. 50, No. 4. pp. 609–614.
17. Yan Ding, Qizhen Du, Liyun Fu, Shikai Jian. Reliability analysis of seismic attribute in the detection of fault-karst. *Interpretation*. 2020. Vol. 8, Iss. 4. pp. 61–70.
18. Yaroslavtsev A., Bobrov V., Zhikin A. Engineering 3D Seismic Survey on the Potash Mine Territory. *Engineering Geophysics 2017 : 13th Conference and Exhibition*. Kislovodsk, 2017. pp. 43–51.
19. Yinling Guo, Suping Peng, Wenfeng Du, Dong Li. Fault and horizon automatic interpretation by CNN: a case study of coalfield. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2020. Vol. 17, Iss. 6. pp. 1016–1025.
20. Haibin Di, Dengliang Gao. 3D Seismic Flexure Analysis for Subsurface Fault Detection and Fracture Characterization. *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174, Iss. 3. pp. 747–761.