

УДК 550.834

Жикин Александр Андреевич
младший научный сотрудник,
Горный институт Уральского отделения РАН,
614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78-А
e-mail: alexzhikin@gmail.com

Санфиоров Игорь Александрович
доктор технических наук, профессор,
директор,
Горный институт Уральского отделения РАН
e-mail: sanf@mi-perm.ru

Фатькин Константин Борисович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Горный институт Уральского отделения РАН
e-mail: asa@mi-perm.ru

**КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛНОВЫХ
ОБРАЗОВ ТИПОВЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СОЛЯНОЙ
ТОЛЩИ ВЕРХНЕКАМСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ И
МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ**

Аннотация:

Рассмотрены типичные структурные и структурно-литологические неоднородности соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВКМКС), влияющие на безопасность ведения горных работ. Обоснована возможность выделения неоднородностей соляных комплексов с применением сейсморазведочных технологий в рамках реализации наземных и шахтных сейсморазведочных исследований. Представлены результаты сейсмического моделирования для структур аномального строения ВКМКС, рассчитаны динамические характеристики теоретических волновых картин и выявлены закономерности их изменения. Обобщены признаки проявления конкретных неоднородностей соляной толщи в сейсмических атрибутах волнового поля.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение солей, шахтная и малоуглубинная сейсморазведка, геологические неоднородности, сейсмическое моделирование, динамические параметры волнового поля.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.118

Zhikin Alexander A.
Junior Researcher,
Mining Institute, Ural Branch of RAS,
614007 Perm, 78-A Sibirskaya Str.
e-mail: alexzhikin@gmail.com

Sanfirov Igor A.
Doctor of Technical Sciences, Professor, Director,
Mining Institute, Ural Branch of RAS
e-mail: sanf@mi-perm.ru

Fatkin Konstantin B.
Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher,
Mining Institute, Ural Branch of RAS
e-mail: asa@mi-perm.ru

**WAVE PATTERNS CLASSIFICATION
OF TYPICAL GEOLOGICAL
HETEROGENEITIES OF THE SALT
FORMATION OF THE UPPER KAMA
POTASSIUM AND MAGNESIUM SALTS
DEPOSIT**

Abstract:

The paper considers typical structural and structural-lithological heterogeneities of the salt strata of the Upper Kama potassium and magnesium salts deposit, which affect the safety of mining operations. The study substantiates the possibility of identifying heterogeneities of salt complexes using seismic technologies in the framework of the implementation of shallow and mine seismic surveys. The results of seismic modeling for the structures of the anomalous structure of the salt deposit are presented, the dynamic characteristics of theoretical wave patterns are calculated, and the patterns of their change are revealed. We generalize here the signs of the specific inhomogeneities of the salt stratum in the seismic attributes of the wave field.

Key words: Upper Kama potassium and magnesium salt deposit, shallow and mine seismic surveys, geological heterogeneities, seismic modeling, dynamic parameters of seismic wave field

Статья посвящается известному российскому ученому в области открытой разработки месторождений, теории проектирования месторождений и геоинформационного моделирования в горном деле, доктору технических наук, профессору Корнилкову Сергею Викторовичу.

Коллектив авторов Горного института УрО РАН горячо поздравляет Сергея Викторовича с юбилеем, желает творческих успехов и крепкого здоровья!

Введение

Крупнейшее в Европе Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей (ВКМКС) имеет сложное геологическое строение, и на отдельных участках горного отвода необходимы детальные исследования и достоверная локализация физико-геологических неоднородностей, представляющих потенциальную угрозу целостности водо-защитной толщи и сохранности рудников [1, 2, 3]. Зачастую такие неоднородности имеют незначительные размеры, неоднородное тонкослоистое строение и латеральную изменчивость физических свойств.

ВКМКС является месторождением пластового типа. Геологический разрез может быть осложнен несогласными формами залегания, для изучения которых наиболее подходят модели непараллельно-слоистых сред. Для них характерен ряд общих признаков, таких как тонкая слоистость, с залеганием пластов от субгоризонтального до сложноскладчатого, с параллельными и непараллельными границами раздела пластов; небольшая, до 500 м, глубина залегания продуктивных толщ и значительная латеральная изменчивость физических параметров.

По данным ряда исследователей [4, 5, 6, 7, 8] для ВКМКС к такого рода объектам относятся:

- 1) зоны трещиноватости;
- 2) зоны лито-фациального замещения промышленных пластов в форме галитовых «аномалий» в калийной залежи;
- 3) складчатость;
- 4) участки соляного палеокарста.

Отмеченные особенности строения и свойств обуславливают существенную неоднозначность отображения аномальных структур в волновом поле. Анализ «волновых образов» и закономерностей изменения их динамических и кинематических параметров на основе двумерных (2D) наблюдений позволяет определить тип и пределы распространения подобных неоднородностей [2, 9].

Результаты исследования

С целью уточнения характерных признаков их проявления в волновых полях выполнено математическое моделирование типичных для соляной толщи ВКМКС неоднородностей. Расчет синтетических данных выполнен со следующими параметрами: система наблюдения – симметричная расстановка, шаг между пунктами приема и пунктами возбуждения – 8 м, импульс – симметричный, максимальная частота сигнала 80 Гц, шаг дискретизации – 0,5 мс, количество активных каналов – 64.

Особую опасность при ведении очистных работ представляют собой зоны трещиноватости как водопроницаемые участки массива водозащитной толщи (ВЗТ). Кроме того, в пределах данных зон в интервале продуктивной толщи формируются благоприятные условия для возникновения газодинамических явлений (ГДЯ).

В сейсмогеологической модели зоны трещиноватости отображаются в виде областей с пониженными значениями скоростей распространения сейсмических волн относительно вмещающего массива. Для модели выбран интервал геологического разреза с соляными пластами продуктивной и надпродуктивной толщи. На основании формулы для средней скорости $V_{\text{ср}}$:

$$V_{\text{ср}} = \frac{(h_1 + h_2)}{\left(\frac{h_1}{V_1} + \frac{h_2}{V_2}\right)},$$

где h_1 и h_2 , V_1 и V_2 – возможные мощности и скорости упрощенной двухфазной модели среды, справедливой для конкретного значения $V_{\text{ср}}$, и, принимая $V_{\text{ср}} = V_{\text{н}}$, можно рассчитать варианты причин подобного изменения интервальной скорости ($V_{\text{н}}$). Таким образом, во всех интервалах в пределах обозначенной нами зоны трещиноватости возможно понижение значений $V_{\text{н}}$ на 150 – 350 м/с.

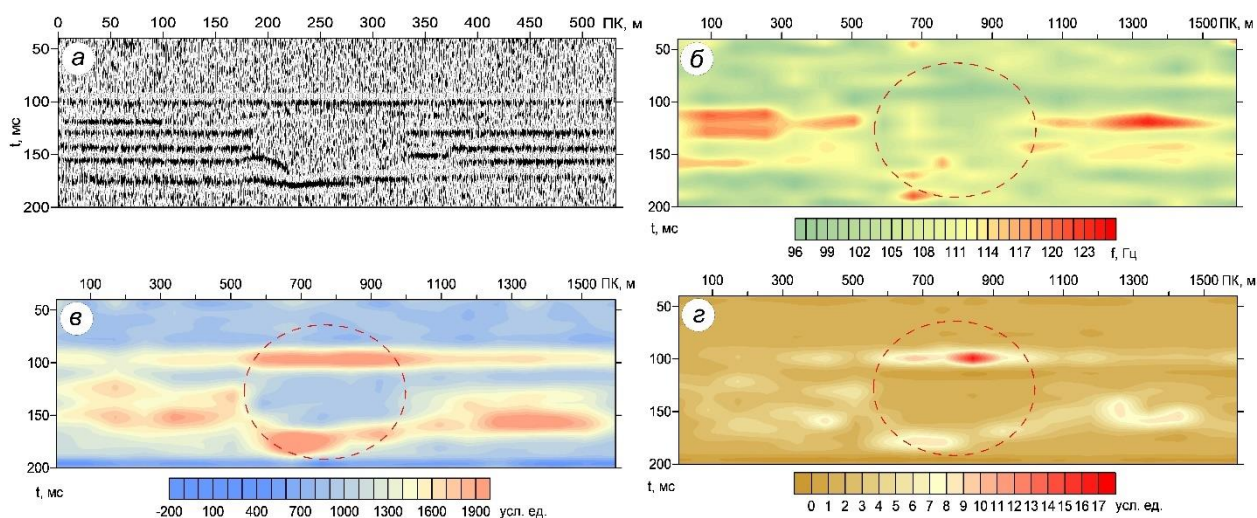


Рис. 1. Модельный суммарный временной разрез ОГТ зоны трещиноватости в соляной толще (а) и его динамические характеристики: распределение частот (б), амплитуд (в) и когерентности (г)

На теоретическом временном разрезе, полученном в результате моделирования зоны трещиноватости (рис. 1а), явно выделяется область, в которой отмечается потеря корреляции отражающих горизонтов. Такой эффект вызван отсутствием контрастных по физическим свойствам границ в заданной зоне трещиноватости.

Анализ частотной составляющей волнового поля и когерентности показал значительное снижение рассматриваемых параметров на участке расположения трещиноватых пород (рис. 1б, г). Так, отклонения среднего значения частоты для аномальной области разреза (ПК 500 – 1000) относительно смежных (нормальных) составило 18 – 25 %. Наибольшие изменения отмечаются для амплитуд. Разница между нормальным и аномальным значениями достигает порядка 75 % (рис. 1в).

Зоны замещения или галитизации сильвинитовых пластов широко распространены на территории ВКМКС. По некоторым данным они занимают суммарно 3 – 5 % площади распространения пласта КрП [8]. Безрудные «окна» образуются в трещиноватых зонах, по которым могли мигрировать подземные воды [8], и они представляют потенциальную угрозу ведению горных работ. Аномальные галитовые образования подразделяются на открытый, экранированный и сквозной типы.

К экранированному типу относится большинство изученных зон галитизации. Для них характерно залегание одного или нескольких пластов карналлитовой зоны, сложенных пестрыми сильвинитами непосредственно над зоной галитизации (рис. 2а). Характерной особенностью данных зон является то, что пласты карналлитовых пород, относящиеся к различным горизонтам, являются экраном для проникающих снизу растворов [5], преобразующих минеральный состав пород.

Сквозной тип характеризуется галитизацией всех пластов сильвинитовой и карналлитовой зон при полноте их разреза (присутствует покровная каменная соль и маркирующий горизонт подстилающей каменной соли). Отличие внутреннего строения от остальных изученных зон галитизации заключается в том, что все пласты сильвинит-карналлитовой зоны представлены каменной солью (рис. 2б).

Отсутствие зависимости между строением соляных комплексов и размещением в них рассматриваемых аномалий отсутствует, что существенно осложняет прогнозирование участков размещения зон замещения на основе лишь геологической информации. Значительное отличие скоростей распространения упругих волн в каменной (замещающей) соли (4100 – 4200 м/с) по сравнению с карналлитом (3600 –

3800 м/с) и сильвинитом (3800 – 3900 м/с) обуславливает возможность применения малоглубинных и шахтных сейсморазведочных технологий [10].

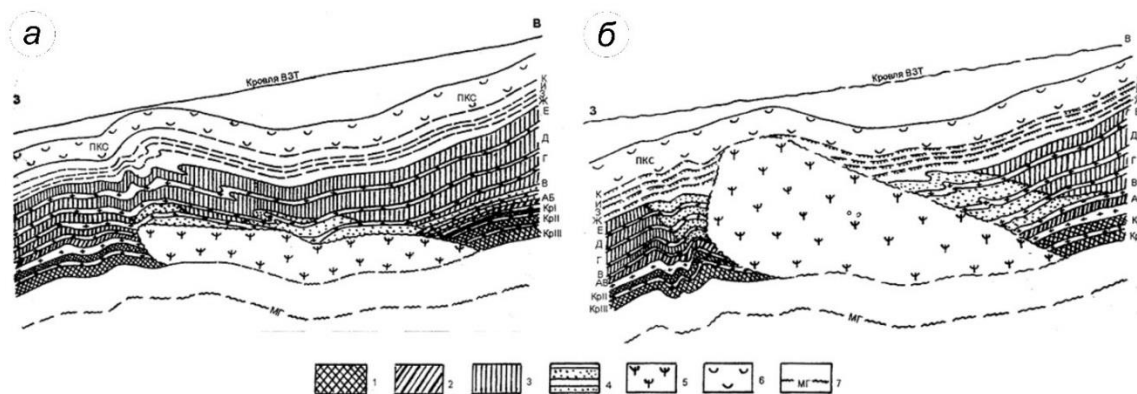


Рис. 2. Зоны замещения экранированного (а) и сквозного (б) типов (по Н.М. Джиноридзе):
 1 – красный сильвинит; 2 – пласт АБ; 3 – карналлит; 4 – пестрый сильвинит;
 5 – зона разубоживания (замещения); 6 – ПКС; 7 – маркирующая глина (МГ)

В зависимости от типа зоны замещения их проявление в теоретических волновых полях имеет ряд различий.

На временном разрезе экранированной зоны замещения и его динамических характеристиках наблюдаются незначительные амплитудные аномалии (рис. 3а), понижение видимой частоты в зоне галитизации (рис. 3б) и выпадение отражающего горизонта на участке ПК 500 – 1200 (рис. 3а). Однако вышележащие пласты карналлитовой зоны выделяются на разрезе достаточно уверенно. Изменение частоты в интервале, включающем аномальную область (ПК 400 – 1100), составило 20 – 30 % по сравнению с фоновыми значениями. Аналогичным уровнем изменчивости характеризуется и отношение сигнал/шум. Наибольшие отклонения наблюдаются для амплитуд. Разница между нормальным и аномальным значениями достигает порядка 67 %.

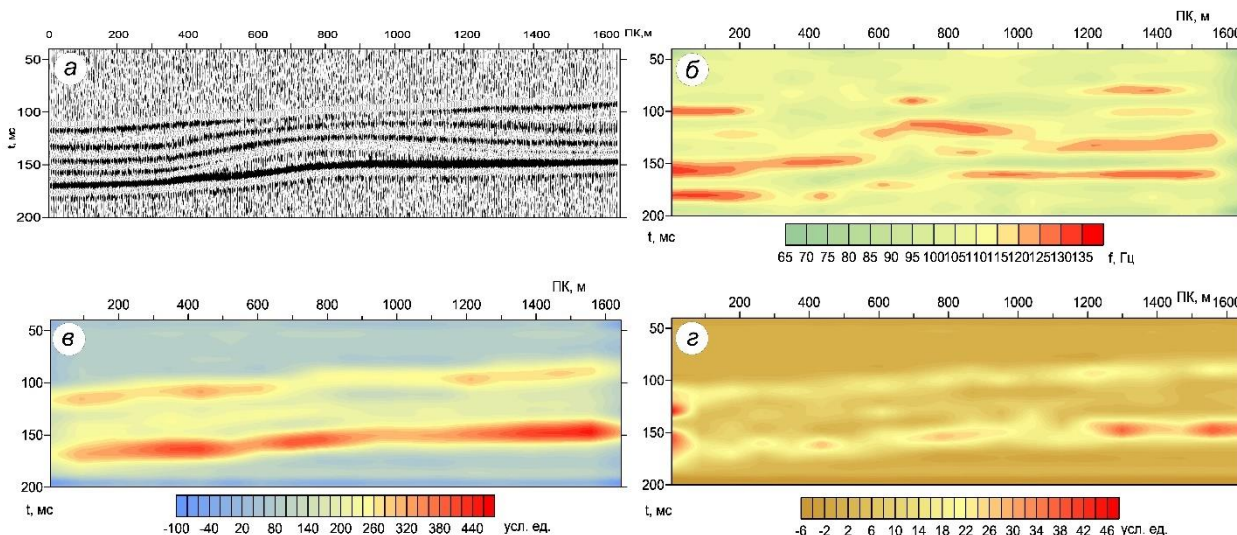


Рис. 3. Модельный суммарный временной разрез ОГТ экранированной зоны замещения (галитизации) продуктивного интервала соляной толщи (а) и его динамические характеристики: распределение частот (б), амплитуд (в) и когерентности (з)

Основные признаки зоны замещения сквозного типа связаны с амплитудными аномалиями. Анализ динамических параметров выявил увеличение амплитуд на краях зоны замещения (рис. 4*в*), где происходит смещение в низкочастотную область спектра колебаний (рис. 4*б*) и уменьшение в центре за счет деструктивной интерференции отраженных и дифрагированных волн. Отсутствие отражающих горизонтов в аномалеобразующей зоне объясняется тем, что здесь нет контрастных по физическим свойствам границ (рис. 4*а*). Изменение частоты в интервале, включающем аномальную зону (ПК 500 – 1100), составило 18 – 25 % относительно фона. Когерентность (отношение сигнал/шум) в зоне аномалии так же мало отличается от нормального значения. Наибольшие отклонения вновь отмечаются для амплитуд. Разница между нормальным и аномальным значениями достигает порядка 75 %.

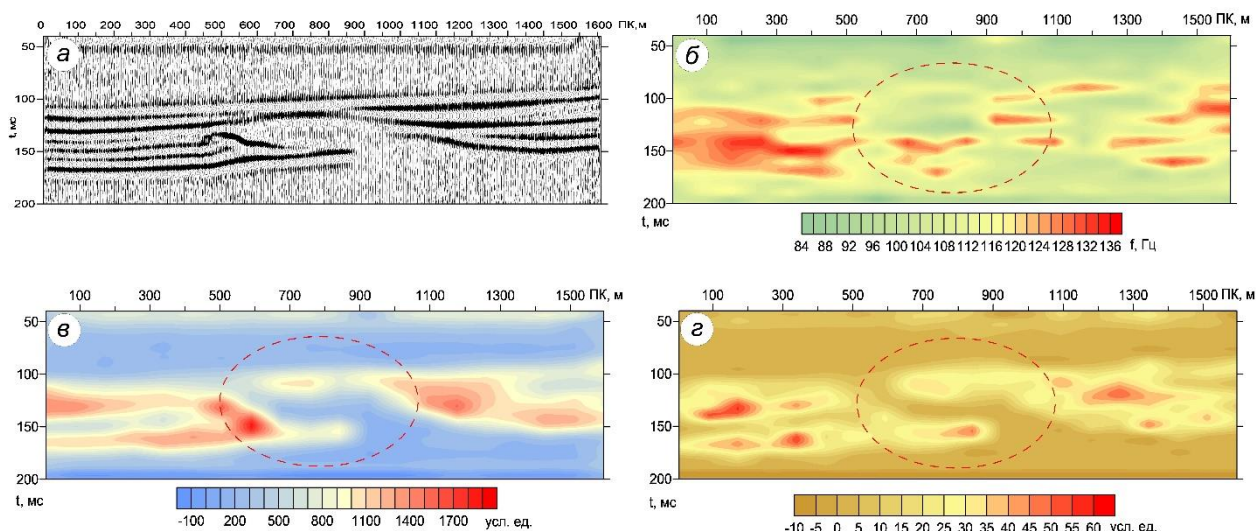


Рис. 4. Модельный суммарный временной разрез ОГТ зоны замещения (галитизации) сквозного типа продуктивного интервала соляной толщи (*а*) и его динамические характеристики: распределение частот (*б*), амплитуд (*в*) и когерентности (*г*)

Горные выработки калийных рудников ВКМКС располагаются внутри регионально-складчатого этажа деформаций, внутри его деформационная складчатость оказывает определенное влияние на технологию выемки калийных руд. Интенсивность дислоцированности калийных солей изменяется как в зависимости от местоположения относительно внешних тектонических форм, так и внутри их. В первом случае более сложное внутреннее тектоническое строение наблюдается в сводовых частях куполов и более простое – в мульдах. Геологическими работами установлены раздувы мощности калиеносных пластов на участках куполов.

Особое место в тектоническом строении ВКМКС занимают широтные прогибы. Это крупные желобообразные образования с крутыми бортами и неровным дном. В качестве модели геологической среды, характеризующейся наличием амплитудной складчатой зоны, представлены результаты математического моделирования волнового поля для борта прогиба.

На временном разрезе (рис. 5*а*) четко проявляются характерные для подобных участков аномалии волнового поля – срывы осей синфазности и амплитудные аномалии в пределах пикетов 350 – 550. Изменение частоты в аномальной зоне (ПК 350 – 550) составляет 25 – 30 % по сравнению с фоном (рис. 5*б*). Когерентность (отношение сигнал/шум) в зоне аномалии отличается от нормального значения на 63 % (рис. 5*г*). Наибольшему изменению подверглась амплитуда сигнала. Разница между нормальным и аномальным значениями достигает порядка 75 % (рис. 5*в*).

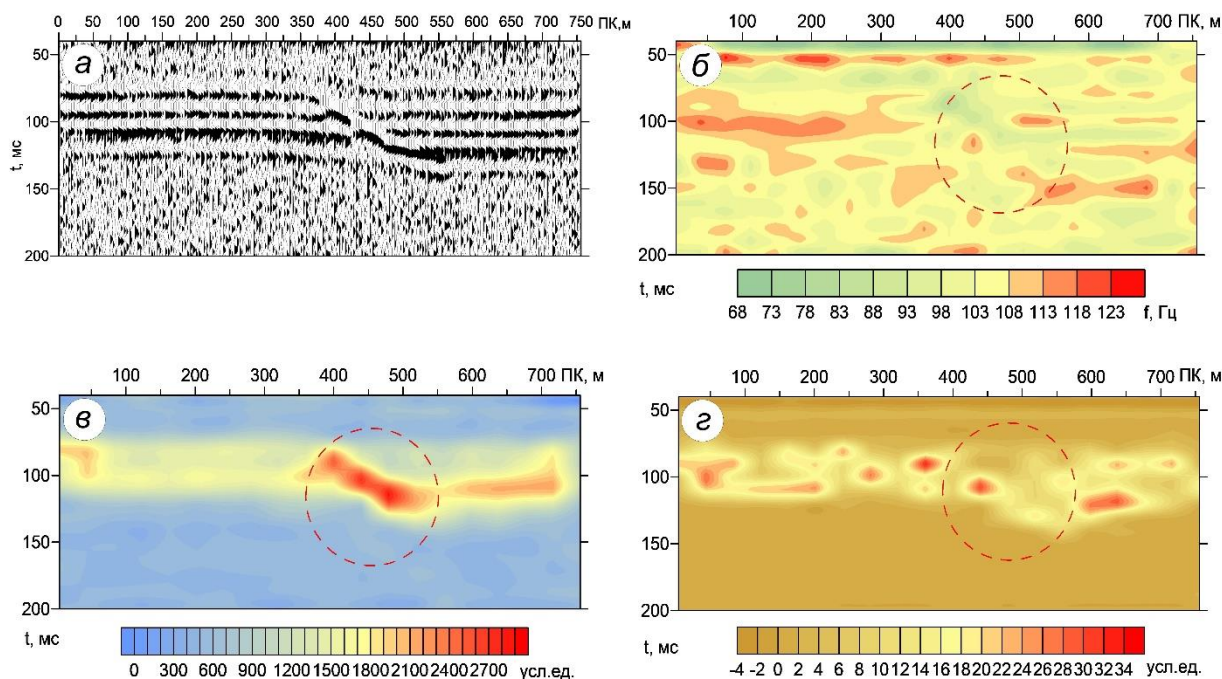


Рис. 5. Модельный суммарный временной разрез ОГТ борта прогиба в пределах продуктивного интервала соляной толщи (а) и его динамические характеристики: распределение частот (б), амплитуд (в) и когерентности (з)

Палеокарстовые процессы на территории ВКМКС достаточно широко развиты, ими затронуто 27 % площади калиеносной залежи [7]. В пределах зон их развития наблюдается выщелачивание каменной и калийной солей подземными водами и накопление на их месте нерастворимых компонентов, содержащихся в соляных породах. Последние формируют так называемые гипсово-глинистые и гипсово-ангидритные шляпы. Выщелачивание соляных пород подземными водами наиболее интенсивно протекает на участках тектонических поднятий и куполов, где практически отсутствует верхний водоносный горизонт, а также там, где местоположение поверхностных водостоков совпадает с вершинами тектонических структур. Основная угроза для сохранности рудника в пределах подобных геологических образований возникает за счет выклинивания пластов водозащитной и продуктивной толщ.

Модель геологического разреза на участке развития палеокарста представляет собой левое крыло антиклинальной структуры с полным выщелачиванием калиеносной толщи к ее вершине (рис. 4а), продуктивные пласты выклиниваются на поверхность соляного зеркала. Сверху соляной комплекс перекрывается слоем пород вторичного литогенеза – гипсово-глинистой шляпой (ГГШ).

В пределах участка развития палеокарста породы, перекрывающие калийную залежь, характеризуются высокими скоростями распространения упругих волн продольного типа – 3500 – 5000 м/с. Нижележащие выклинивающиеся отложения представлены гипергенными соленосными пластами карналлита, сильвинита, каменной соли со скоростями прохождения продольных волн в диапазоне от 3600 до 4300 м/с. В данном случае имеет место периодическая (физически шероховатая) отражающая граница, для которой характерна сложная интерференция волн, дифрагированных от разных участков границы, что обусловлено изменением физических свойств соприкасающихся сред, приводящим к изменению коэффициентов отражения – прохождения.

Расчет теоретического волнового поля выполнен для условий шахтной сейсморазведки [11]. В сумме рассчитано два ансамбля трасс для продольных (Р) и поперечных

(S) волн, по 430 сейсмограмм общего пункта возбуждения для каждого типа, с использованием следующих параметров: система наблюдения – симметричная, шаг пунктов приема и пунктов возбуждения – 2 м, шаг дискретизации – 0,1 мс, импульс – симметричный, максимальная частота сигнала – 800 Гц, количество активных каналов – 64.

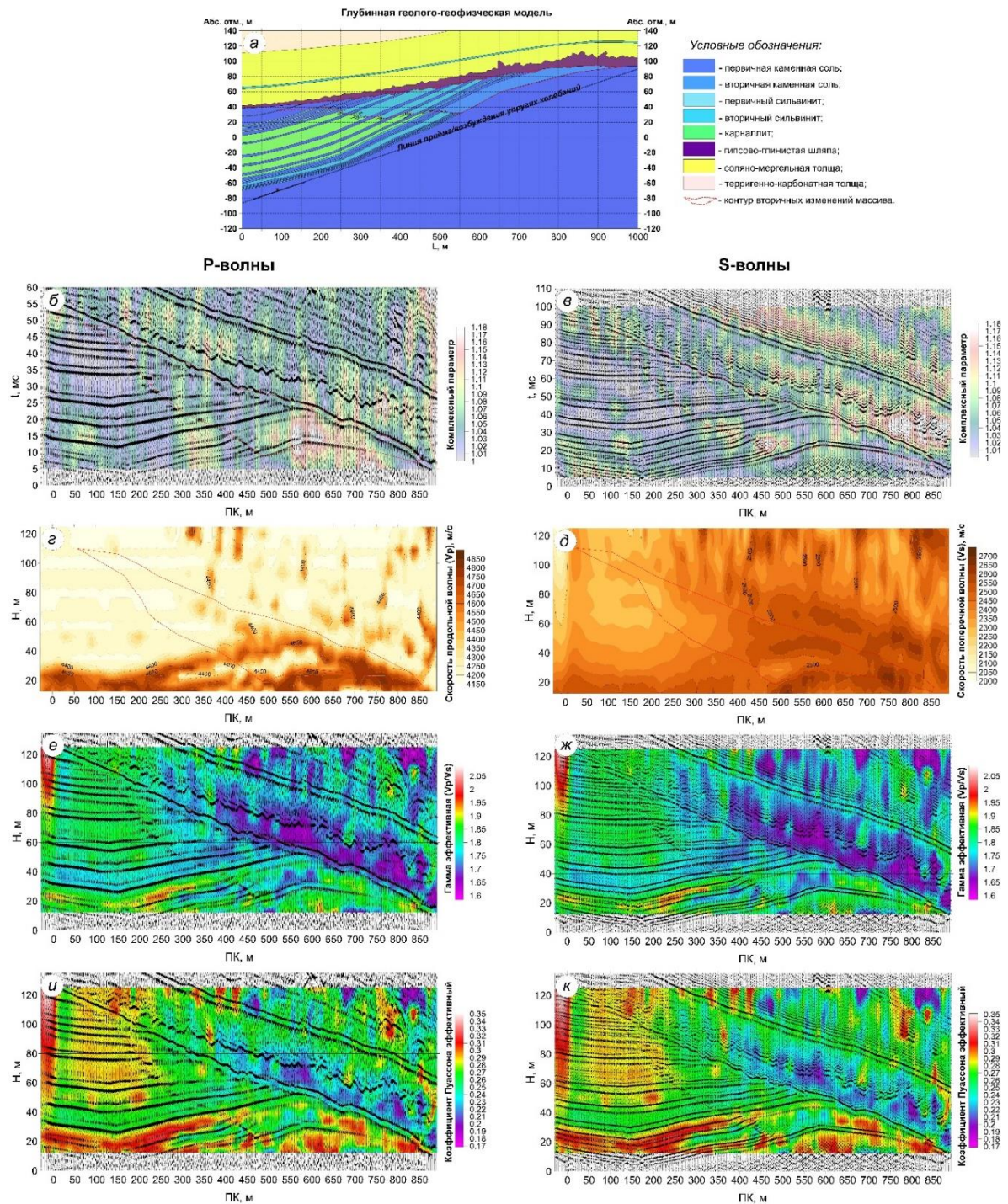


Рис. 6. Модель участка гипергенного преобразования соляных пород для различных типов упругих волн (продольных (P) и поперечных (S)):

- a* – глубинная геолого-геофизическая модель;
- б, в* – временной разрез ОГТ (цветом обозначено распределение комплексного параметра – логической суммы наиболее характерных динамических параметров разреза);
- з, д* – скоростная характеристика; *е, ж* – распределение эффективной Гамма (γ);
- и, к* – распределение эффективного коэффициента Пуассона

Анализ распределения динамических параметров и скоростной характеристики временных разрезов для Р и S волн позволил сформировать набор признаков, свидетельствующих о присутствии гипергенных солей в разрезе.

Вторично измененная каменная соль проявляется в следующих характеристиках волнового поля S-волн: 1) на контакте первичный сильвинит и гипергенная соль (ПС-ГС) наблюдается потеря корреляции по сильвиниту, дифрагированные волны, искажение положения (наклона) вышележащего отражающего горизонта; 2) увеличение частоты сигнала на контакте ПС-ГС; 3) значительное падение значения отношения сигнал/помеха (рис. 6в).

В характеристиках Р-волн на контакте ПС-ГС отмечено: 1) потеря корреляции отражающей границы от сильвинитового пласта, наличие аномалий типа «яркое пятно» в месте контакта, искажение положения вышележащего отражающего горизонта; 2) незначительное увеличение частоты сигнала; 3) снижение значений отношения сигнал/помеха (рис. 6б).

На контакте карналлита с гипергенным сильвинитом (К-ГС) формируется набор параметров моделируемой волновой картины, характерный как для S (рис. 6в), так и для Р-волн (рис. 6б): 1) снижение амплитуды сигнала; 2) увеличение частоты сигнала; 3) изменение значений отношения сигнал/помеха. Контакт К-ГС для Р-волн также проявляется наличием аномалии «яркое пятно».

Суммарное влияние вышеуказанных проявлений поведения описанных параметров волнового поля отображается в распределении комплексного параметра – цветовом представлении логической суммы наиболее контрастных динамических характеристик (амплитуда, частота, когерентность, скорость), нормированных к заданному значению.

Кроме характерных изменений динамических атрибутов волнового поля на участках формирования вторичных солей данные зоны уверенно локализуются в кинематических параметрах. Распределение эффективного параметра гамма (γ – отношение скоростей продольных волн к скоростям поперечных волн V_p/V_s) и эффективного коэффициента Пуассона ($\mu = \frac{\gamma^2 - 2}{2 \cdot (\gamma^2 - 1)}$) позволяет оценить акустические свойства модельного массива солей, содержащего вторично измененные породы (рис. 6е, ж, и, к).

Наибольшая контрастность по вышеописанным акустическим атрибутам синтезированных волновых образов наблюдается на участках примыкания «вторичная каменная соль – первичный сильвинит» и «вторичный сильвинит – карналлит».

Заключение

На основании полученных результатов следует наибольшая информативность динамических параметров для структурного типа геологических неоднородностей: складчатость, трещиноватость, сквозная зона замещения. Проявление кинематических параметров наиболее характерно для неоднородностей структурно-литологического типа: экранированная зона замещения, палеокарст. Выявленные закономерности изменений характеристик синтетических волновых полей формализованы и представлены в табл. 1.

Подобная классификация получаемых волновых образов и их динамических характеристик позволяет унифицировать и систематизировать процесс интерпретации, повысить в целом информативность исследования, а также является основой для разработки алгоритмов автоматической локализации аномалий в регистрируемых волновых полях, свойственных конкретным объектам геофизических изысканий.

Таблица 1
Значения параметров волнового поля типовых неоднородностей ВКМКС

Вид неоднородности	Амплитуда сигнала	Частота сигнала	Когерентность сигнала (отношение сигнал/помеха)	Скоростная характеристика сигнала
Экранированная зона замещения	Снижение до 67 % от фона	Увеличение до 20 – 30 % от фона	Снижение корреляции	Увеличение значений эффективных скоростей над зоной
Сквозная зона замещения	Снижение до 75 % от фона	Увеличение до 18 – 25 % от фона	Нарушение корреляции границ до полной потери	Увеличение значений эффективных скоростей над зоной
Трещиноватости массива	Снижение до 75 % от фона	Снижение на 18 – 25 % от фона	Нарушение корреляции границ до полной потери	Понижение значений
Складчатость	Аномалия «яркое пятно», увеличение до 75 % от фона	Снижение на 25 – 30 % от фона	Нарушение корреляции границ, резкий разрыв	Характерных признаков не выявлено
Палеокарст (зона вторичных изменений массива)	Аномалия «яркое пятно» на контакте с вторичными породами	Увеличение до 30 – 60 % от фона	Нарушение корреляции границ	Характерных признаков не выявлено

Список литературы

1. Байбакова Т.В., Ярославцев А.Г., Миронов С.А., 2022. Шахтные сейсмические исследования литологических неоднородностей. *Тезисы докладов 16-й международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика–2020»*. DOI: 10.3997/2214-4609.202051061
2. Санфилов И.А., 1996. *Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ*. Екатеринбург: УрО РАН.
3. Санфилов И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Герасимова И.Ю., Фатькин К.Б., Глебов С.В., 2019. Картирование локальных нарушений водозащитной толщи комплексом многоуровневых сейсморазведочных исследований различной размерности. *Тезисы докладов 15-ой научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2019»*, 1 – 11. DOI: 10.3997/2214-4609.201901743
4. Бельтюков Г.В., 2000. *Карстовые и гипергенные процессы в эвапоритах*: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук, Пермь.
5. Джиноридзе Н.М., Мелкова Н.В., Павленский А.Н., Ковалевич В.М., Кузнецов Н.В., Плотников Ю.А., 1990. К проблеме происхождения зон замещения в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей. *Условия образования месторождений калийных солей*. Новосибирск: Наука, С. 165 – 174.
6. Иванов А.А., 1963. О пестрых силвинитах Верхнекамского месторождения калийных солей. *Тр. ВСЕГЕИ. Нов. сер.*, № 99, С. 153 – 180.
7. Копнин В.И., 1991. Строение водозащитной толщи Верхнекамского месторождения

дения и вопросы ее формирования. *Проблемы изучения водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных солей: мат-лы II рег. сов-я*. Березники: АО «Уралкалий», 56 – 65.

8. Кудряшов А.И., 2013. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд., перераб. Москва: Эпсилон Плюс.

9. Ярославцев А.Г., Фаткин К.Б., 2020. Шахтные сейсмоакустические исследования при контроле предохранительных целиков в калийных рудниках. *Тезисы докладов 16-й международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика–2020»*. DOI: 10.3997/2214-4609.202051043

10. Фаткин К.Б., 2008. Локализация и идентификация физико-геологических неоднородностей соляной толщи методами сейсмического амплитудного анализа (на примере ВКМКС): дис. ... канд.техн. наук. Гор. ин-т УрО РАН, Пермь.

11. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., 2007. Комплексные методические решения в шахтной сейсмоакустике. *Геофизика*, № 5, С. 10 –15.

References

1. Baibakova T.V., Yaroslavtsev A.G., Mironov S.A., 2022. Shakhtnye seismicheskie issledovaniya litologicheskikh neodnorodnostei [Mine seismic studies of lithological inhomogeneities]. *Tezisy dokladov 16-i mezhdunarodnoi nauchno–prakticheskoi konferentsii "Inzhenernaya i rudnaya geofizika–2020"*. DOI: 10.3997/2214-4609.202051061

2. Sanfirov I.A., 1996. Rudnichnye zadachi seismorazvedki MOGT . [Mining tasks of seismic exploration of MOGT]. Ekaterinburg: UrO RAN.

3. Sanfirov I.A., Babkin A.I., Yaroslavtsev A.G., Gerasimova I.Yu., Fat'kin K.B., Glebov S.V., 2019. Kartirovanie lokal'nykh narushenii vodozashchitnoi tolshchi kompleksom mnogourovennykh seismorazvedochnykh issledovaniy razlichnoi razmernosti. [Mapping of local disturbances in the protective layer by a complex of multilevel seismic surveys of various dimensions]. *Tezisy dokladov 15-oi nauchno-prakticheskoi konferentsii i vystavki "Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2019"*, P. 1 – 11. DOI: 10.3997/2214-4609.201901743

4. Bel'tyukov G.V., 2000. Karstovyye i gipergennyye protsessy v evaporitakh [Karst and hypergenic processes in evaporites]: avtoref. dis. ... d-ra geol.-min. nauk, Perm'.

5. Dzhinoridze N.M., Melkova N.V., Pavlenskii A.N., Kovalevich V.M., Kuznetsov N.V., Plotnikov Yu.A., 1990. K probleme proiskhozhdeniya zon zameshcheniya v predelakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliinykh solei [On the problem of the origin of substitution zones within the Verkhnekamskoye potash deposit]. *Usloviya obrazovaniya mestorozhdenii kaliinykh solei*. Novosibirsk: Nauka, P. 165 – 174.

6. Ivanov A.A., 1963. O pestyrykh sil'vinitakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliinykh solei [On variegated silvinites of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit]. *Tr. VSEGEI. Nov. ser., № 99*, P. 153 – 180.

7. Kopnin V.I., 1991. Stroenie vodozashchitnoi tolshchi Verkhnekamskogo mestorozhdeniya i voprosy ee formirovaniya [The structure of the water-protective layer of the Verkhnekamskoye deposit and the issues of its formation]. *Problemy izucheniya vodozashchitnoi tolshchi na Verkhnekamskom mestorozhdenii kaliinykh solei: mat-ly II reg. sov-ya*. Berезники: АО "Uralkalii", P.56 – 65.

8. Kudryashov A.I., 2013. Verkhnekamskoe mestorozhdenie solei. 2-e izd., pererab [Verkhnekamskoye salt deposit. 2nd ed., reprint]. Moscow: Epsilon Plyus.

9. Yaroslavtsev A.G., Fat'kin K.B., 2020. Shakhtnye seismoakusticheskie issledovaniya pri kontrole predokhranitel'nykh tselikov v kaliinykh rudnikakh [Mine seismoacoustic studies in the control of safety targets at potassium mines]. *Tezisy dokladov 16-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Inzhenernaya i rudnaya geofizika–2020"*. DOI: 10.3997/2214-4609.202051043

10. Fat'kin K.B., 2008. Lokalizatsiya i identifikatsiya fiziko-geologicheskikh neodnorodnostei solyanoi tolshchi metodami seismicheskogo amplitudnogo analiza (na

primere VKMKS): dis. ... kand.tekhn. nauk [Localization and identification of physical and geological inhomogeneities of the salt stratum by methods of seismic amplitude analysis (on the example of VKMKS): dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Gor. in-t UrO RAN, Perm'.

11. Sanfirov I.A., Babkin A.I., Yaroslavtsev A.G., 2007. Kompleksnye metodicheskie resheniya v shakhtnoi seismoakustike [Complex methodological solutions in mine seismoacoustics]. Geofizika, № 5, P. 10 –15.