

Таким образом, учитывая сложность локализации известных карстовых полостей в пределах массива Ледяной горы (глубина, размеры, мощность покрывающих пород и др.), для решения обратной задачи дополнительно использованы данные анализа сейсмических атрибутов. Применение неформализованных подходов, основанных на принципах динамической интерпретации, позволило детализировать сейсмогеологический разрез. Полученные результаты не противоречат ожидаемым геологическим представлениям. Уточним, что алгоритм решения обратной задачи в условиях сложнопостроенной тонкослоистой среды в обязательном порядке должен включать этап сопоставления полевых материалов и результатов предварительного многопараметрического моделирования с учетом анализа природы выявляемых искажений волнового поля. При этом для интеграции результатов моделирования к реальным условиям может потребоваться несколько итераций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер 124020500029-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура: монография. / ПГУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2010. – 249 с.: ил.
2. Красиков А.В. Уточнение морфометрических показателей гротов и галерей Кунгурской Ледяной пещеры по результатам топографо-геодезических работ // Изв. вузов. Горн. журн. – 2022. – № 4. – С. 76-89. – DOI: 10.21440/0536-1028-20212-4-76-89.
3. Красиков А.В., Трапезников Д.Е. Новые данные о литологическом разрезе массива Ледяной горы // Горное эхо. – 2020. – № 4 (81). – С. 24-30. – DOI: 10.7242/echo.2020.4.5.
4. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянско-го; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил.
5. Пугин А.В., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В., Новикова П.Н. Опыт-методические геофизические работы на территории историко-природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская Ледяная пещера» // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2014. – № 2, Вып. 21. – С. 191-197.
6. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И., Фаткин К.Б., Бобров В.Ю. Малоглубинная сейсмостратиграфия // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 11-18.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2025.1.8

ПОДБОР МОДЕЛИ СРЕДЫ ПРИ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

С.О. Горкунов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Скоростной анализ сейморазведочных работ – необходимый этап интерпретации сейморазведочных данных. Применение при цифровой обработке процедур, направленных на повышение регулярности сейсмической записи, что необходимо при проведении работ на урбанизированных территориях, приводит к сглаживанию латеральной изменчивости анализируемых кинематических параметров упругих волн. Оценить диапазон их отклонений на участках с аномальными особенностями геологического строения, выделяемыми по другим параметрам волнового поля, в процессе проведения мониторинговых наблюдений, представляется возможным на основании итерационного решения прямой задачи или подбора модели среды.

Ключевые слова: подбор модели среды, полномасштабное моделирование, цифровая обработка, интерпретация, мониторинговые наблюдения.

Введение

Одним из основных геофизических методов изучения калийной залежи в пределах Верхнекамского месторождения солей (ВКМКС) является малоглубинная сейсморазведка методом отраженных волн, выполняемая по технологии общей глубинной точки МОГТ [1, 2]. Мониторинговые исследования МОГТ выполняются с целью контроля изменений упругих свойств среды и выделения зон, отличающихся от вмещающего массива пород, а также изучения особенностей геологического строения водозащитной толщи (ВЗТ).

С целью определения оптимального варианта подбора модели среды приведены результаты количественной оценки изменения интервальных скоростей, выполненной по результатам сравнительного анализа теоретических и реальных данных.

Моделирование данных мониторинговых наблюдений

Полноволновое сейсмическое моделирование позволяет использовать все типы полезных волн и волн-помех (отраженные, преломленные, дифрагированные, поверхностные и др.), встречающиеся при реальных полевых наблюдениях [5].

При проведении мониторинговых работ регистрация волнового поля производится со стандартными параметрами системы наблюдений МОГТ, обеспечивающими регистрацию отраженных волн в частотном диапазоне 80-90 Гц, что соответствует требованиям высокоразрешающей сейсморазведки.

Моделирование выполнено с учетом применяемых параметров системы наблюдений с учетом реальных данных, полученных для определенных периодов времени: 2016, 2020 и 2024 годов.

На рисунке 1 представлена модель, сформированная в программном пакете Tesseral Pro [3], по данным мониторинговых работ за 2016 год. Остальные модели выглядят подобным образом, за исключением изменения участков аномалий.

В параметры модели введены значения скоростей продольных и поперечных волн, а также плотности для каждой толщи, слагающей разрез. Для распределения скоростей в каждом выделенном интервале глубин модели использованы базовые точки, позволяющие приблизиться к реальным значениям. Основные отражающие горизонты приурочены к кровле: соляно-мергельной толщи (СМТ), переходной пачки (ПП), карналлитовой зоны (Ек), сильвинитовой зоны (Сил) и к интервалу маркирующей глины (МГ). Аномальные участки выделены замкнутым контуром с подобранными значениями скоростей для конкретных вариантов модели среды.

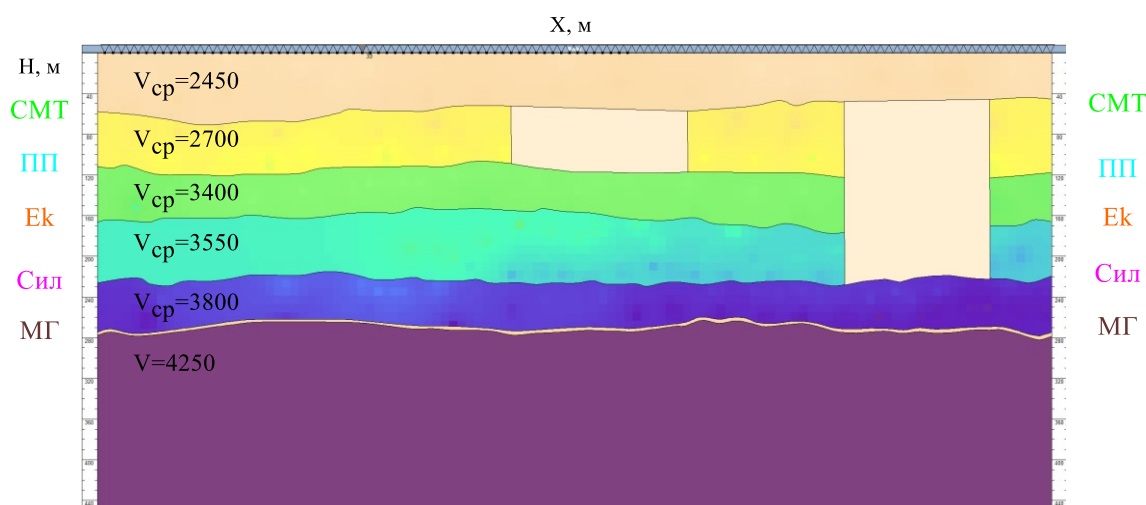


Рис. 1. Модель, сформированная по данным сейсморазведочных работ 2016 г.

Расчет синтетических сейсмограмм выполнен методом 2D Elastic, использующимся для изотропной упругой модели среды. Такой подход позволяет моделировать в 2D распространение сейсмической энергии в твердых средах с учетом эффектов возникновения обменных волн и квазианизотропии, связанной с переслаиванием тонких пластов [3].

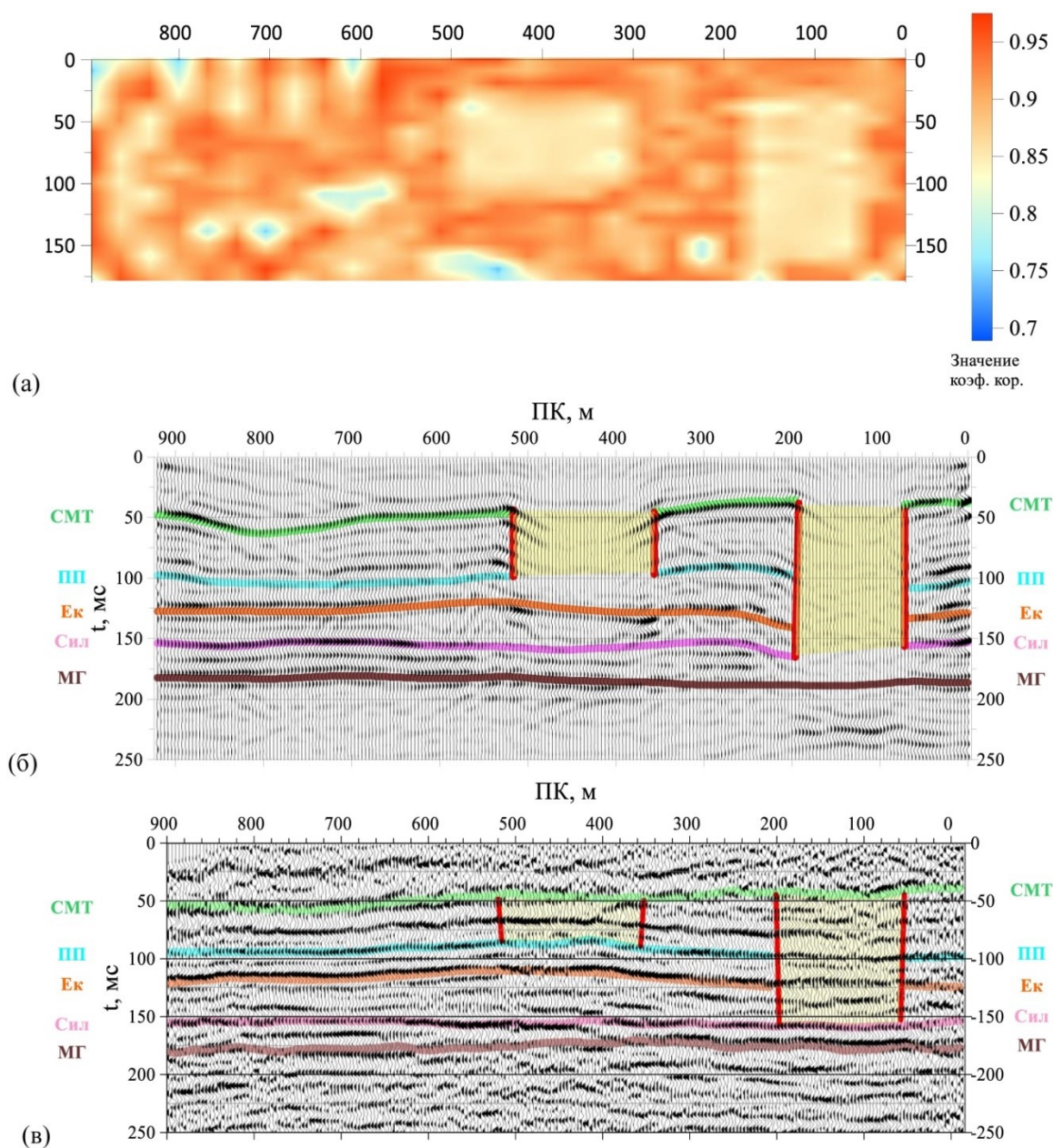


Рис. 2. Коэффициент корреляции (а) синтетического (б) и наблюдаемого (в) волнового полей по данным 2016 г.

Набор синтетических сейсмограмм, получаемых в результате моделирования 2D Elastic, требует обработки с целью подавления волн-помех. С этой целью используется стандартный граф обработки, проверенный на широком спектре сейсмических материалов, полученных на ВКМКС. Применялись следующие процедуры: автоматическая регуляровка амплитуд (АРУ), полосовая и режекторная фильтрации, миграция, деконволюция, суммирование. Результат представлен на рисунке 2а.

Корреляция отражающих горизонтов для реальных и синтетических разрезов выполнялась на основании основных принципов и приемов прослеживания отраженных волн [4].

Сравнение выполняется путем загрузки двух временных разрезов реальных и синтетических данных. Также имеется процедура ввода полосовой фильтрации для подавления помех. Данный метод позволяет определить сходные волновые образы между реальными данными и полученными при моделировании. Сходимость коррелируемых разрезов зависит от точности ввода данных и корректности интерпретации результатов. Корреляция временных разрезов, полученных для материалов 2016 г., наглядно демонстрирует высокую величину коэффициента корреляции.

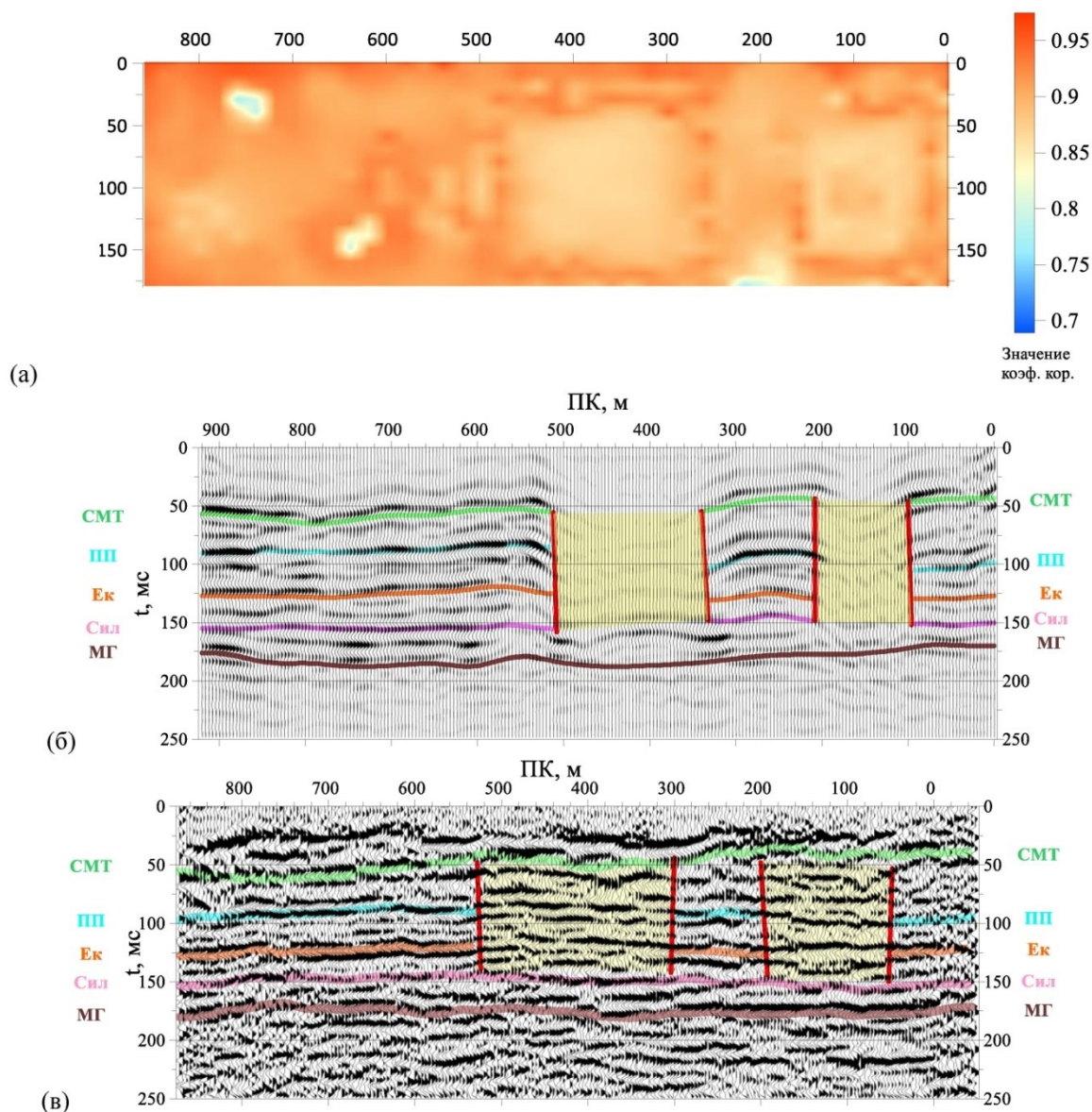


Рис. 3. Коэффициент корреляции (а) синтетического (б) и наблюдаемого (в) волнового полей по данным 2020 г.

В 2020 г. по результатам обработки и интерпретации данным мониторинговых наблюдений отмечено изменение границ участков осложнений волнового поля. Область, ранее отмеченная в интервале СМТ-ПП (50-85 мс), сместилась на интервал СМТ-Сил (50-150 мс), что указывает на продолжение изменения характеристик пород (рис. 3).

Корреляция между временными разрезами 2020 г. и данными, полученными на этапе моделирования, проводилась аналогично 2016 г. На основе сопоставления временных разрезов установлена высокая степень подобия синтетических и реальных наблюдений (рис. 3).

На момент исследования 2024 года (рис. 4) произошло значительное изменение границ осложнений волнового поля: два ранее выделяемых участка объединились в один (ПК 200-520м), что указывает на ослабление характеристик массива пород в центральной части.

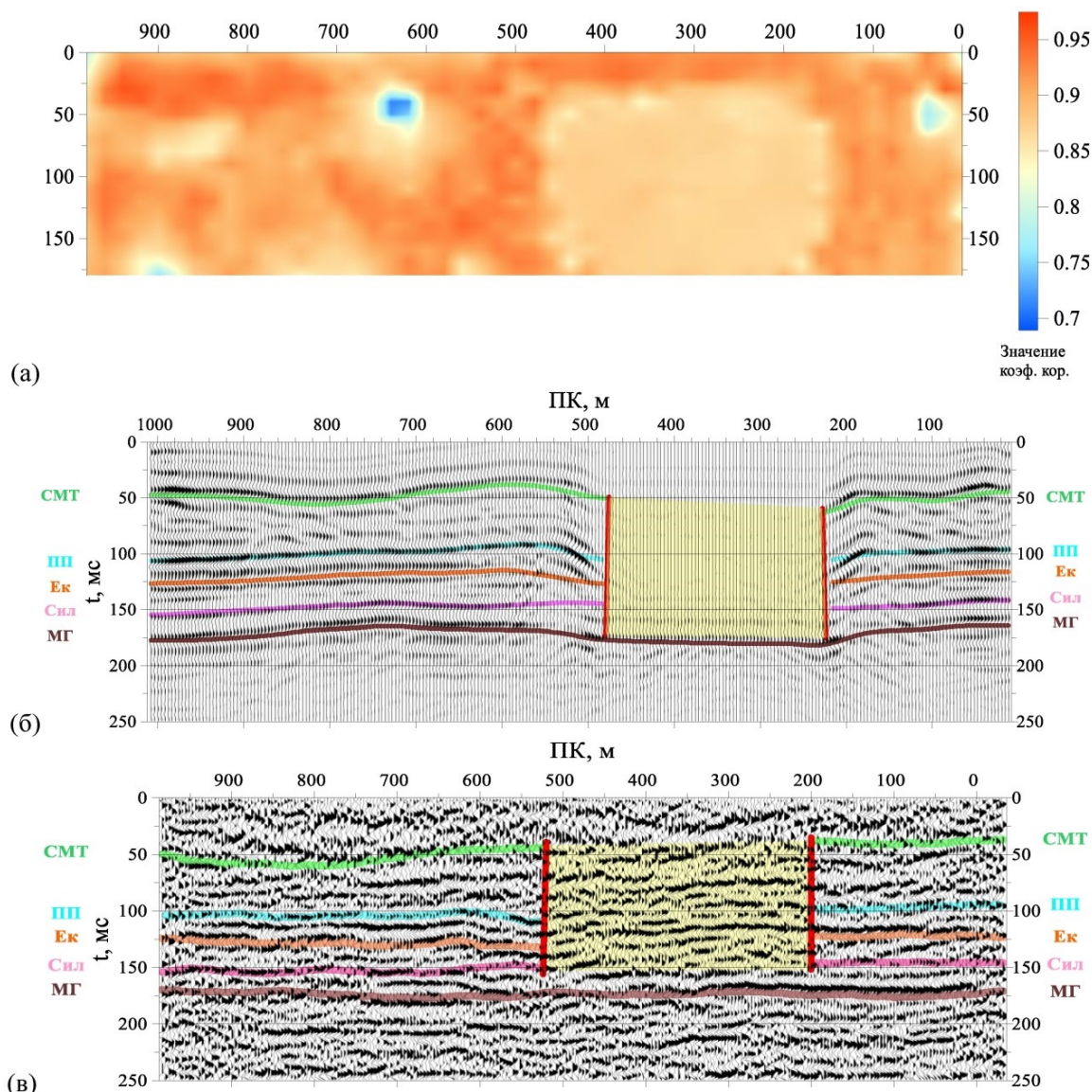


Рис. 4. Коэффициент корреляции (а) синтетического (б) и наблюдаемого (в) волнового поля по данным 2024 г.

Анализ разрезов, полученных в ходе мониторинговых наблюдений за девять лет, позволяет сделать вывод, что в пределах участка исследований наблюдается ухудшение состояния пород в интервале водозащитной толщи (СМТ-Сил). Ситуация требует постоянного контроля за дальнейшей динамикой изменения упругих параметров в разрезе исследуемого участка.

Дополнительно для сравнения полученных результатов синтетических и наблюдаемых полей приведены графики интервальных скоростей (рис. 5). В 2016 году изменение скорости в пределах аномальных участков для реальных данных составляло 2-3% и для синтетических – 4%. Для 2020 года снижение скорости составило 3% для реальных наблюдений и 6% – для полученных при моделировании. В 2024 году изменения величин наблюдаемых скоростей остались без изменений относительно предыдущих этапов, а по данным моделирования составили 5%.

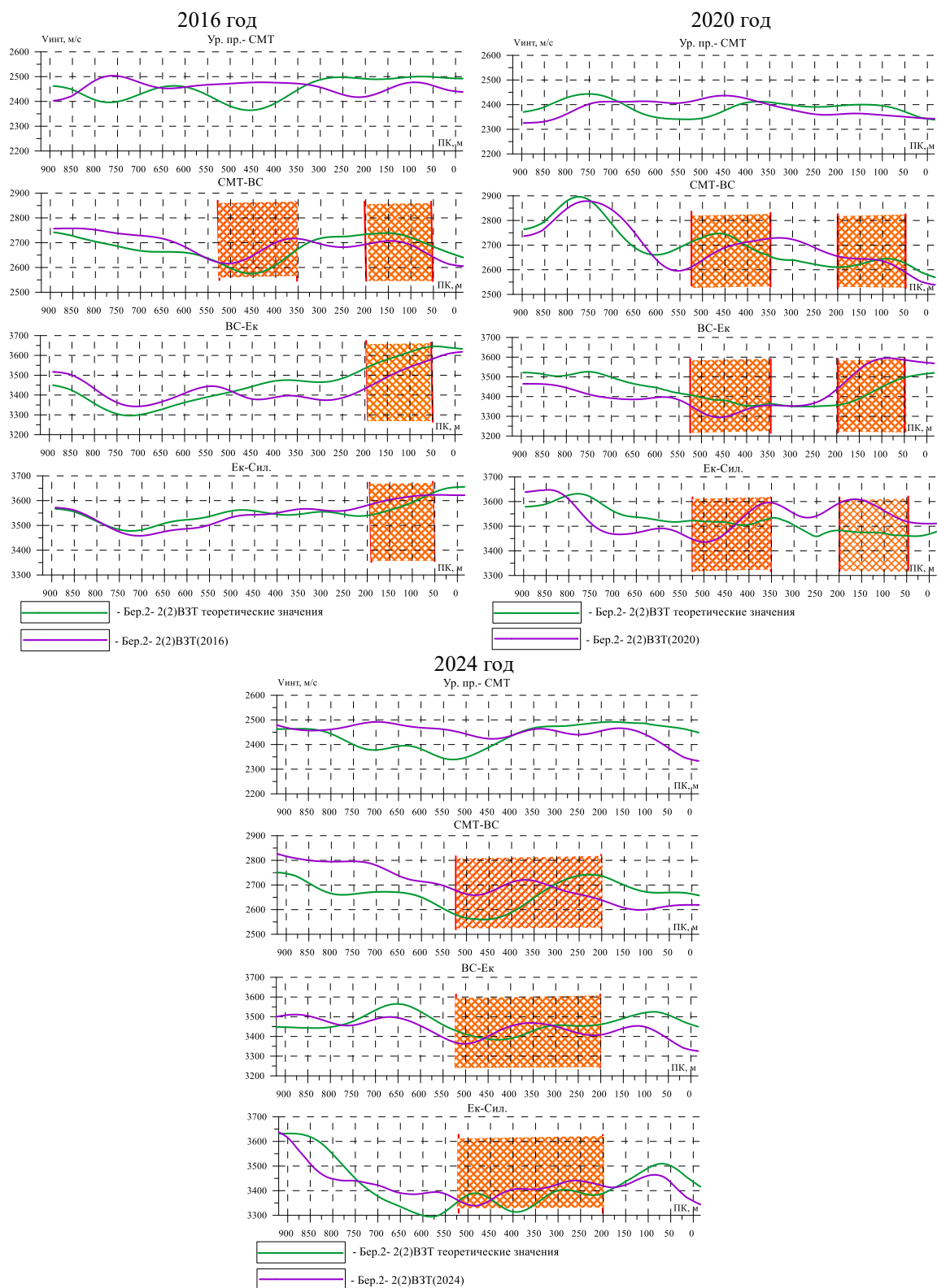


Рис. 5. Графики интервальных скоростей для реальных и полученных в результате моделирования данных

В пределах участков осложнений волнового поля (ПК400) формировались графики изменений интервальной скорости за рассматриваемый временной период. Для сравнения выбраны 2 интервала глубин: ВС-Ек и Ек-Сил. Для ВС-Ек расхождение значений интервальных скоростей, полученных по результатам моделирования с реальны-

ми данными в 2016 г. составляет 3%, в 2020 г. – 1%, в 2024 г – 3%. Для интервала Ек-Сил величины скоростей в 2016 г. практически совпадают, в 2020 г. разница составляет – 2,5%, в 2024 г. – 3%. Таким образом, в интервале ВС-Ек по данным за 2016 и 2020 гг. отмечается снижение интервальной скорости, а по данным за 2024 год по реальным наблюдениям интервальные скорости выросли, а теоретические снизились. В интервале Ек-Сил в 2016, 2020 годах на основе реальных наблюдений изменений в скорости не выявлено и только в 2024 году скорость снизилась на 150 мс, когда как теоретические данные с каждым годом имели снижение. Отсюда следует, что при использовании итерационного метода можно подтвердить достоверность оценки интервальных скоростей.

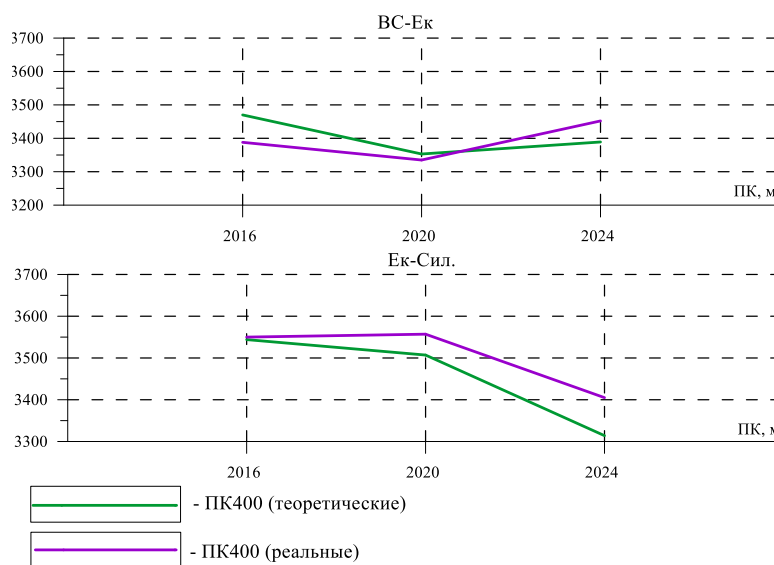


Рис. 6. График сопоставления интервальных скоростей за период наблюдений в интервалах ВС-Ек и Ек-Сил для ПК 400

Заключение

Проведено моделирование с использованием полученных геофизических данных, данный вариант обеспечил хорошее сходство синтетических и реальных волновых полей. Распределение коэффициента корреляции указывает на правильный вариант подбора модели среды, в среднем коэффициент корреляции варьируется в значении 0.8-0.9. Изменение интервальных скоростей в зонах аномалий, от общего массива пород, составила 2-3% при реальных и 4-6% при теоретических данных. Данный диапазон отклонений на участках с аномальными особенностями геологического строения принимается нами, как один из оптимальных вариантов расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка: учебник. – 3-е изд., перераб. – М.: Недра, 1980. – 551 с.
2. 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.
3. Санфиров И.А., Бабкин А.И., Прийма Г.Ю., Ярославцев А.Г., Пригара А.М., Фаткин К.Б., Сейсморазведочные исследования водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных солей // Горн. журн. – 2008. – № 10. – С. 45-48.
4. Mershchiiy V., Kostyukevych A., Iantsevitch I. Application of full-wave forward modeling for seismic exploration feasibility studies // Geoconvention 2022. – Calgary, Canada, 2022. –
5. Tesseral Pro: User's Manual 2019-2021. [Электронный ресурс]. – Текст электронный. – URL: <https://geodevice.co/upload/iblock/657/Tesseral-Pro-User-Manual.pdf>. (дата обращения: 29.01.2025).