

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2025.4.4

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭТАПА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНОГО МОНИТОРИНГА

Д.С. Глебов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Формализации этапа интерпретации данных сейсморазведочного мониторинга основана на расчете коэффициента корреляции временных разрезов общей глубинной точки (ОГТ) и анализе изменений интервальных скоростей. В качестве примера использован профиль, расположенный в пределах города Березники, где проводился регулярный мониторинг в течение 12 лет. Полученные результаты обосновывают степень достоверности экспертных оценок по выделению зон негативных изменений.

**Ключевые слова:** сейсморазведочный мониторинг, коэффициент корреляции, интервальные скорости, формализация интерпретации, аномальные зоны.

Сейсморазведочный мониторинг применяется для контроля состояния породного массива в районах техногенного воздействия, месторождений полезных ископаемых, а также в зонах потенциальной геодинамической активности [1]. Его основная задача – выявление и отслеживание изменений физических свойств горных пород, которые могут повлиять на безопасность эксплуатации территорий и объектов. Наиболее надежные результаты достигаются при регулярных многолетних наблюдениях, позволяющих фиксировать не только текущие изменения, но и их развитие с течением времени.

Одним из важнейших этапов анализа сейсмических данных является интерпретация временных разрезов, на которых визуально выделяются аномальные участки по изменению волнового поля. Несмотря на высокую информативность такого подхода, основанного на экспертной оценке, он не дает возможности количественно проверить и воспроизвести полученные результаты. Использование численных методов позволяет дополнить экспертные выводы и повысить объективность интерпретации.

В данной работе рассмотрен подход к численной формализации интерпретации данных сейсморазведочного мониторинга на примере профильной линии, где с 2013 по 2025 гг. проводились регулярные наблюдения. За этот период сформирован ряд временных разрезов, позволяющий проследить изменения в продуктивной толще. Такой длительный и систематичный мониторинг дает возможность выявить количественные закономерности в изменении сейсморазведочных параметров.

Согласно экспертным оценкам, аномальные зоны на данном профиле впервые выделены в 2011 году, однако до 2021 года они оставались относительно стабильными. Значительные изменения волнового поля фиксируются с 2022 года.

Для численного подтверждения этих изменений в работе применены два подхода: потрассовый анализ коэффициентов корреляции между временными разрезами разных лет и оценка динамики интервальных скоростей в пределах трех стратиграфических интервалов: SMT–PP, PP–ЕК, ЕК–SIL. Комплексное использование этих подходов позволило подтвердить существование аномальных зон, ранее выделенных экспертно, и проследить развитие изменений во времени на количественном уровне.

### Расчет коэффициентов корреляции временных разрезов

Для количественной оценки изменений в волновом поле разработана специализированная программа (Тарантин М.В.), основанная на локальном сравнении фрагментов временных разрезов. Анализ проводился по принципу скользящего окна, которое последовательно перемещалось вдоль профиля и по времени.

На каждом шаге из первого временного разреза выделялось окно заданного размера и сравнивалось с соответствующим окном второго разреза. При этом учитывались возможные фазовые и пространственные смещения между окнами. В каждой позиции рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона между амплитудами сигналов [3], что позволило построить детальную карту распределения корреляции в координатах пикетов и времени.

Использовались следующие параметры оконного анализа:

- размер окна: 20 пикетов  $\times$  5 мс;
- шаг перемещения окна: 1 пикет по горизонтали и 5 мс по времени;
- допуск сдвига: до 1 пикета и 1 мс.

Анализ проводился в трех частотных диапазонах:

- полный частотный диапазон;
- низкочастотный диапазон (20-60 Гц);
- высокочастотный диапазон (70-150 Гц).

В качестве порогового коэффициента корреляции принято значение 0.72. Оно выбрано на основании анализа распределения значений по профилю и визуального сопоставления с ранее выделенными аномалиями. Значения ниже этого порога трактовались как участки ослабленной корреляции, потенциально указывающие на изменения породного массива.

Пример визуального представления результатов корреляционного анализа приведен на рисунке 1.

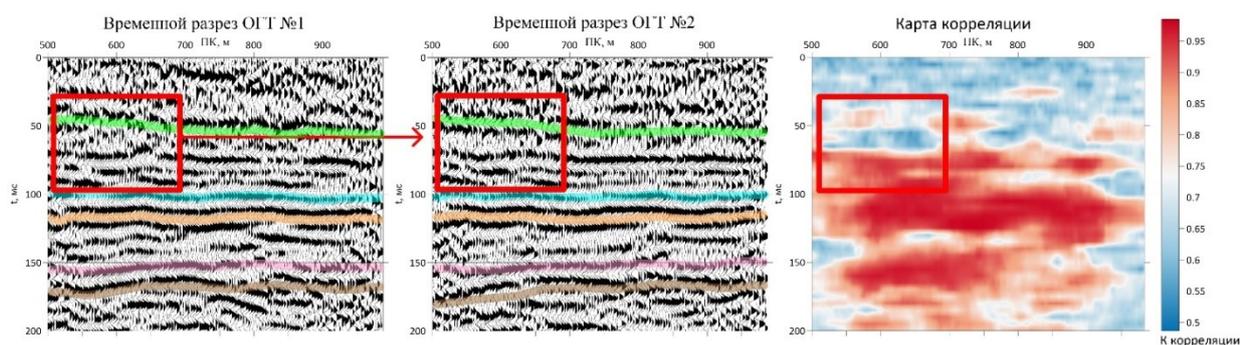


Рис. 1. Визуализация результатов корреляционного анализа

### Коэффициент корреляции временных разрезов

На основании потрассового анализа временных разрезов ОГТ за период 2013-2025 гг. построены карты коэффициента корреляции между разрезами разных лет. Расчеты выполнялись в пределах временного интервала 0-200 мс. На рисунке 2 представлена карта корреляции по полному частотному диапазону. Жёлтым цветом обозначены участки, которые ранее выделялись как участки осложнений волнового поля. Видно, что области с пониженной корреляцией совпадают с этими участками. Особенно устойчивое снижение коэффициента наблюдается в районе пикета 500, где значения многократно опускаются ниже порога 0.72. Это также видно на срезе по данному пикету (рисунок 3), где можно проследить, как коэффициент менялся по годам.

Чтобы понять, как метод работает при разных масштабах изменений, построены карты корреляции для разных частот. На рисунках 4 и 5 представлены карты низкочастотного и высокочастотного диапазонов.

Сравнение карт корреляции для разных частотных диапазонов показывает, что в низкочастотном диапазоне (рисунок 4) значения корреляции в целом выше. Это значит, что на низких частотах изменения выглядят более устойчивыми. Такой диапазон лучше показывает крупные изменения в разрезе и меньше реагирует на шум.

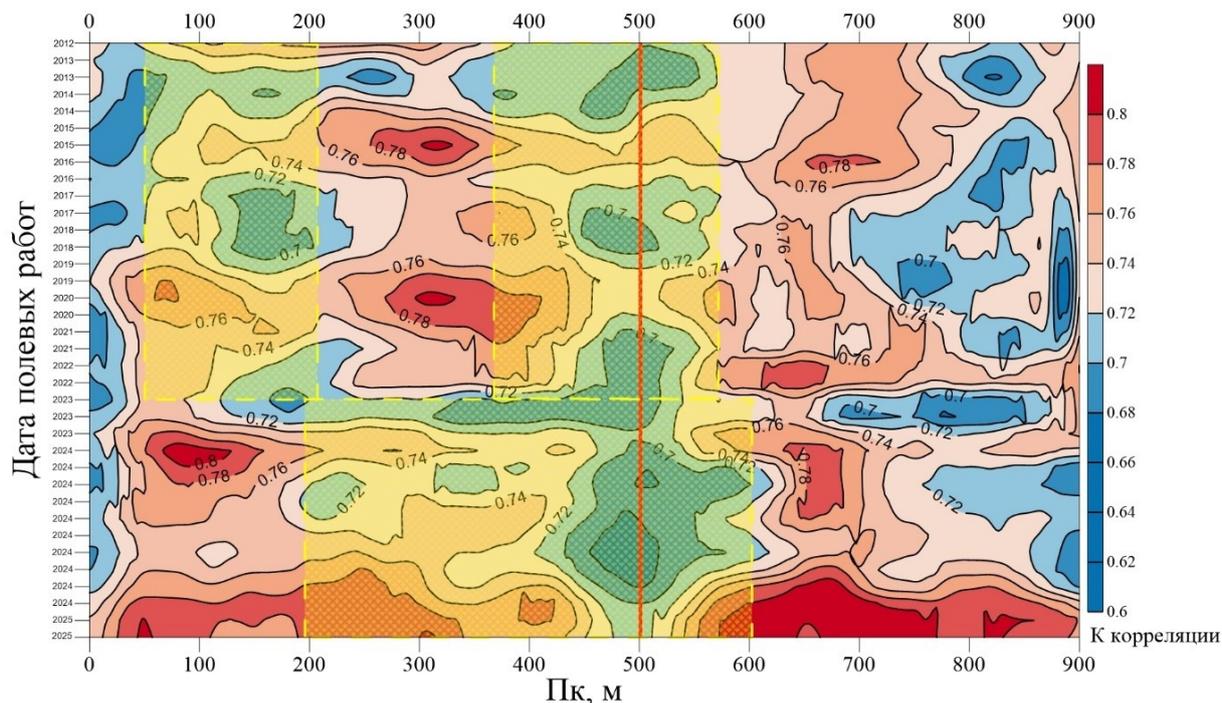


Рис. 2. Карта корреляции в период 2013-2025 гг

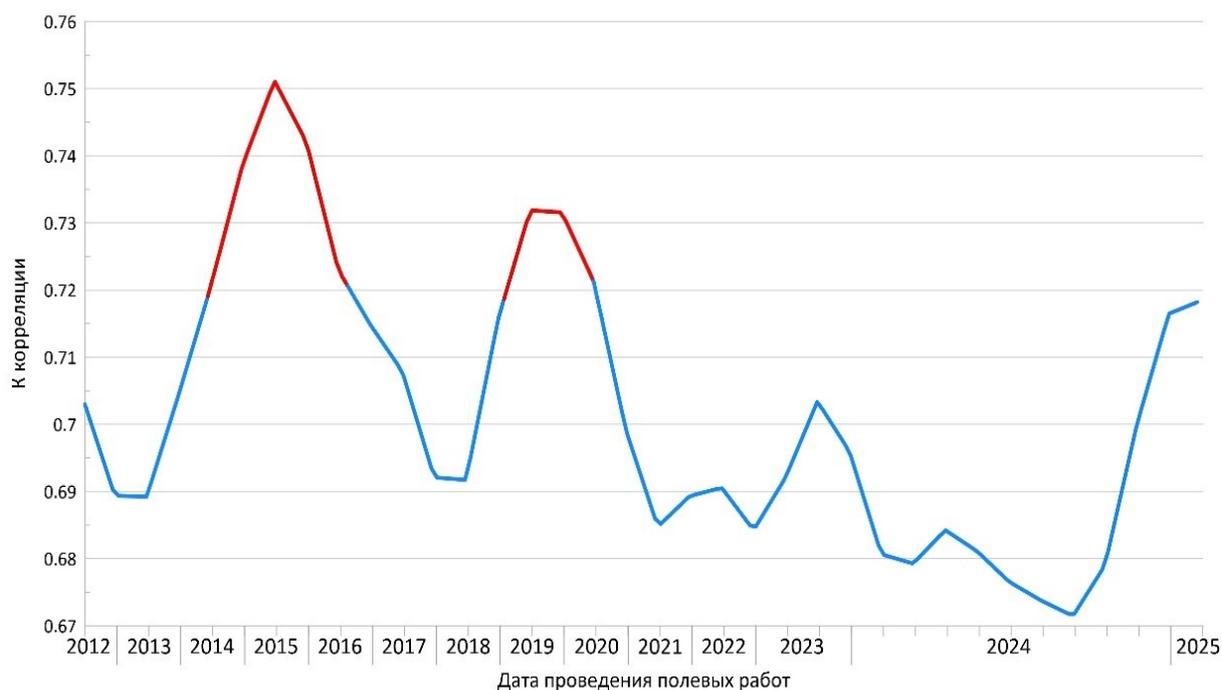


Рис. 3. Значения коэффициента корреляции на 500 пикете

В высокочастотном диапазоне (рисунок 5), наоборот, наблюдается больше зон с пониженной корреляцией. Это связано с тем, что высокие частоты сильнее реагируют на мелкие неоднородности и трещины, а также на возможные помехи. Поэтому аномалии здесь проявляются ярче, но менее стабильно.

Такой подход позволяет использовать оба диапазона для разных целей: низкие частоты – для оценки общего состояния среды, высокие – для поиска локальных нарушений.

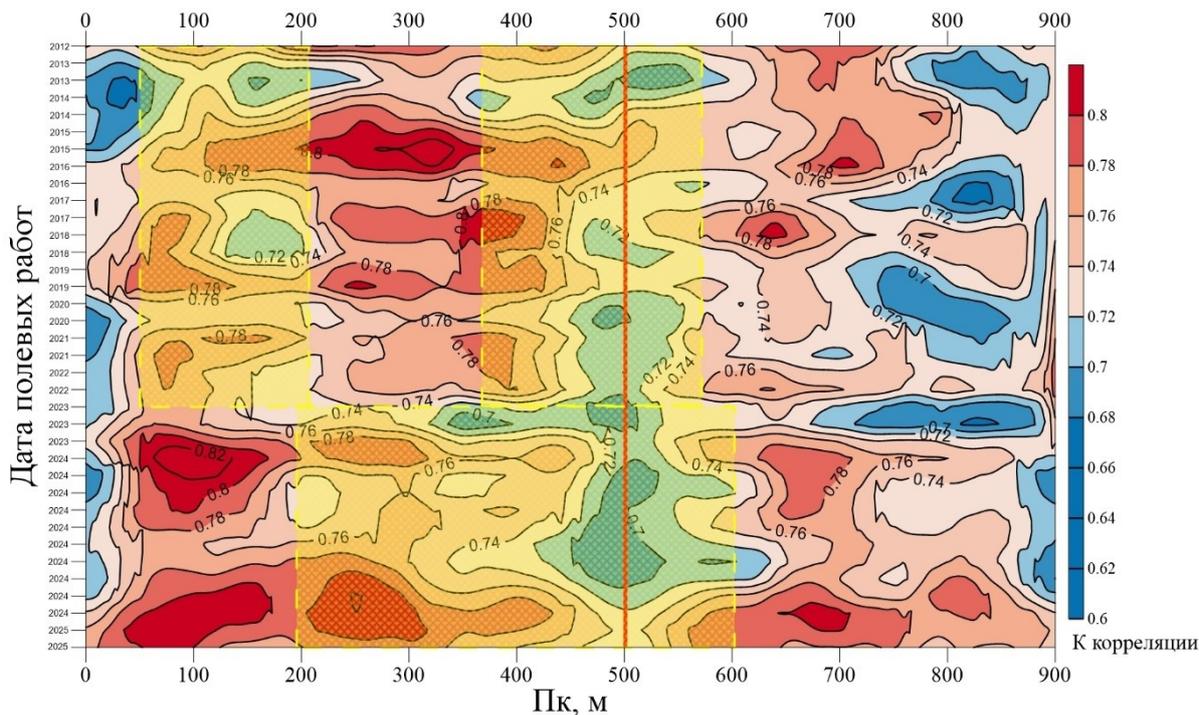


Рис. 4. Карта корреляции по низкочастотному диапазону

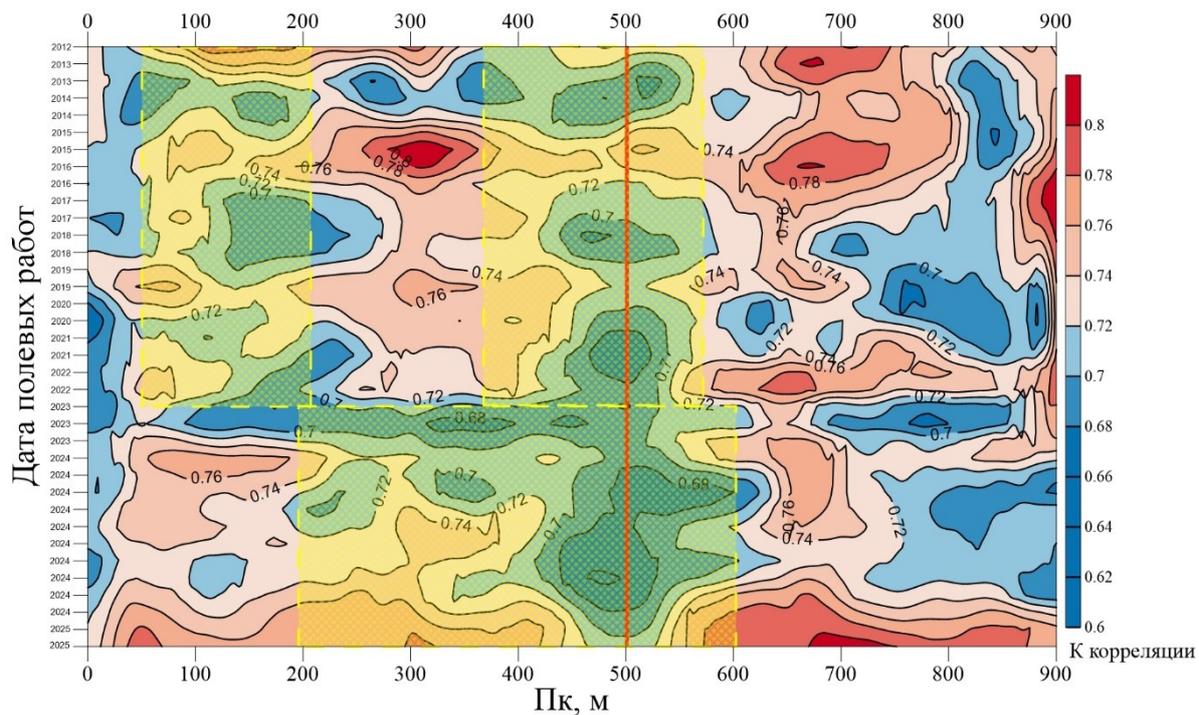


Рис. 5. Карта корреляции по высокочастотному диапазону

**Интервальные скорости**

Изменения интервальных скоростей проанализированы по трём интервалам: SMT–PP, PP–ЕК и ЕК–SIL. На рисунках 6.1-6.3 показано, как менялись скорости в этих интервалах по всему профилю за годы наблюдений. Самые заметные изменения зафиксированы в интервале PP-ЕК, с 2022 года здесь началось устойчивое снижение скоростей. Это совпадает по времени с появлением аномалии, ранее обнаруженной по волновому полю, но произошло с небольшим запаздыванием по отношению к продуктивной толще.

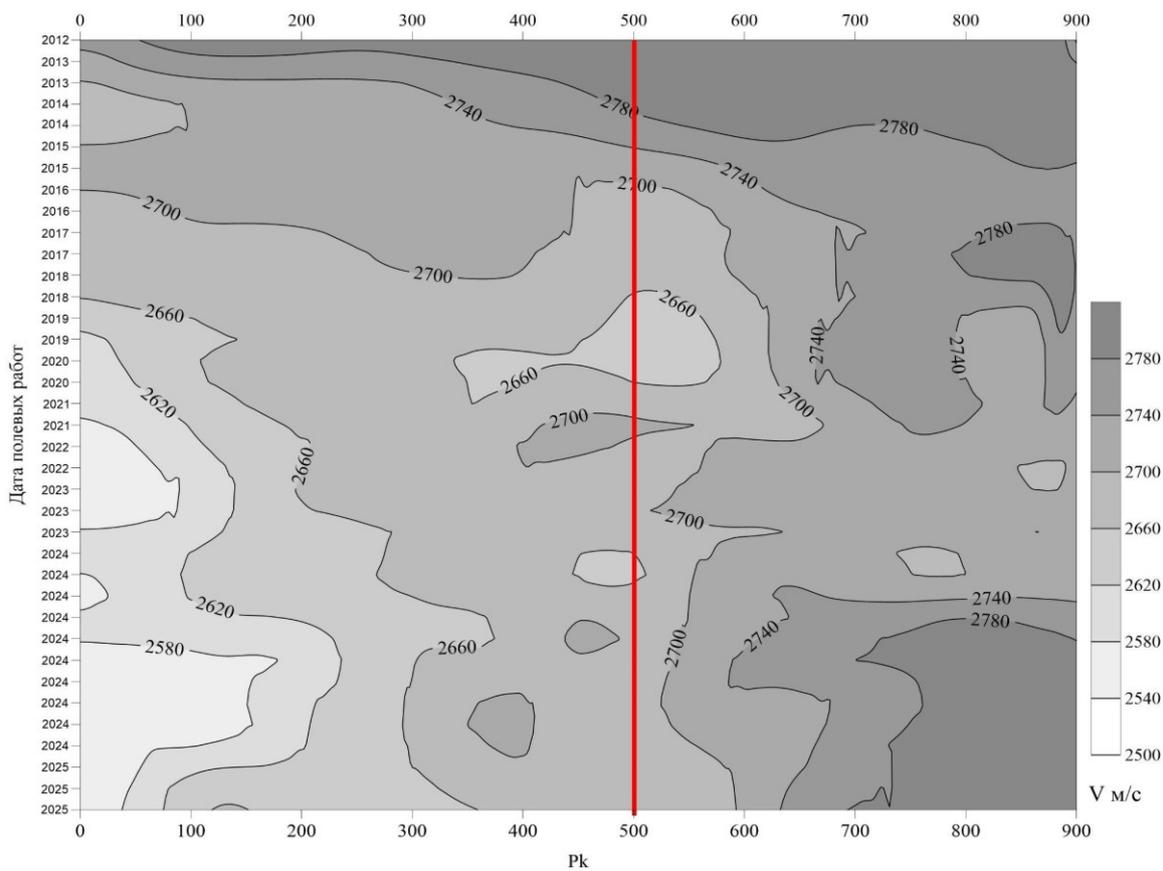


Рис. 6.1. Карта распределения интервальных скоростей SMT-PP

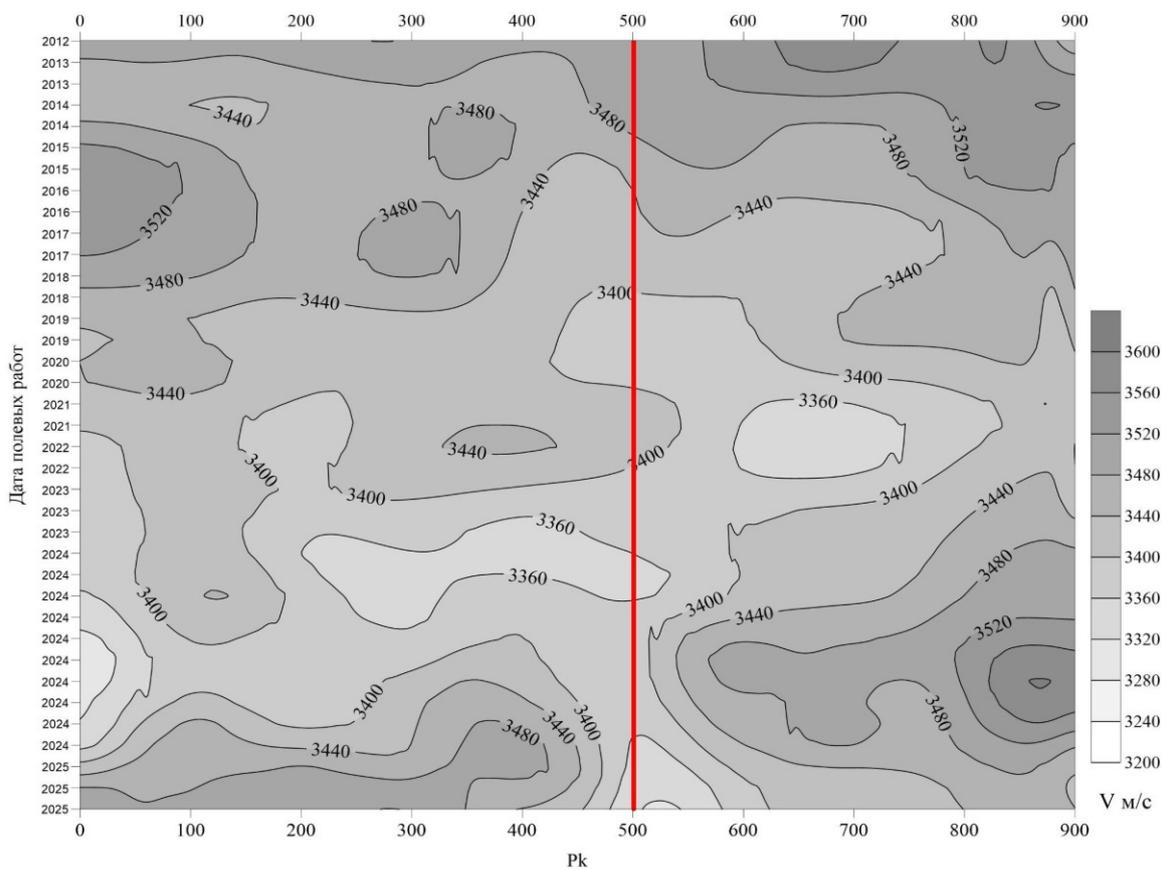


Рис. 6.2. Карта распределения интервальных скоростей PP-EK

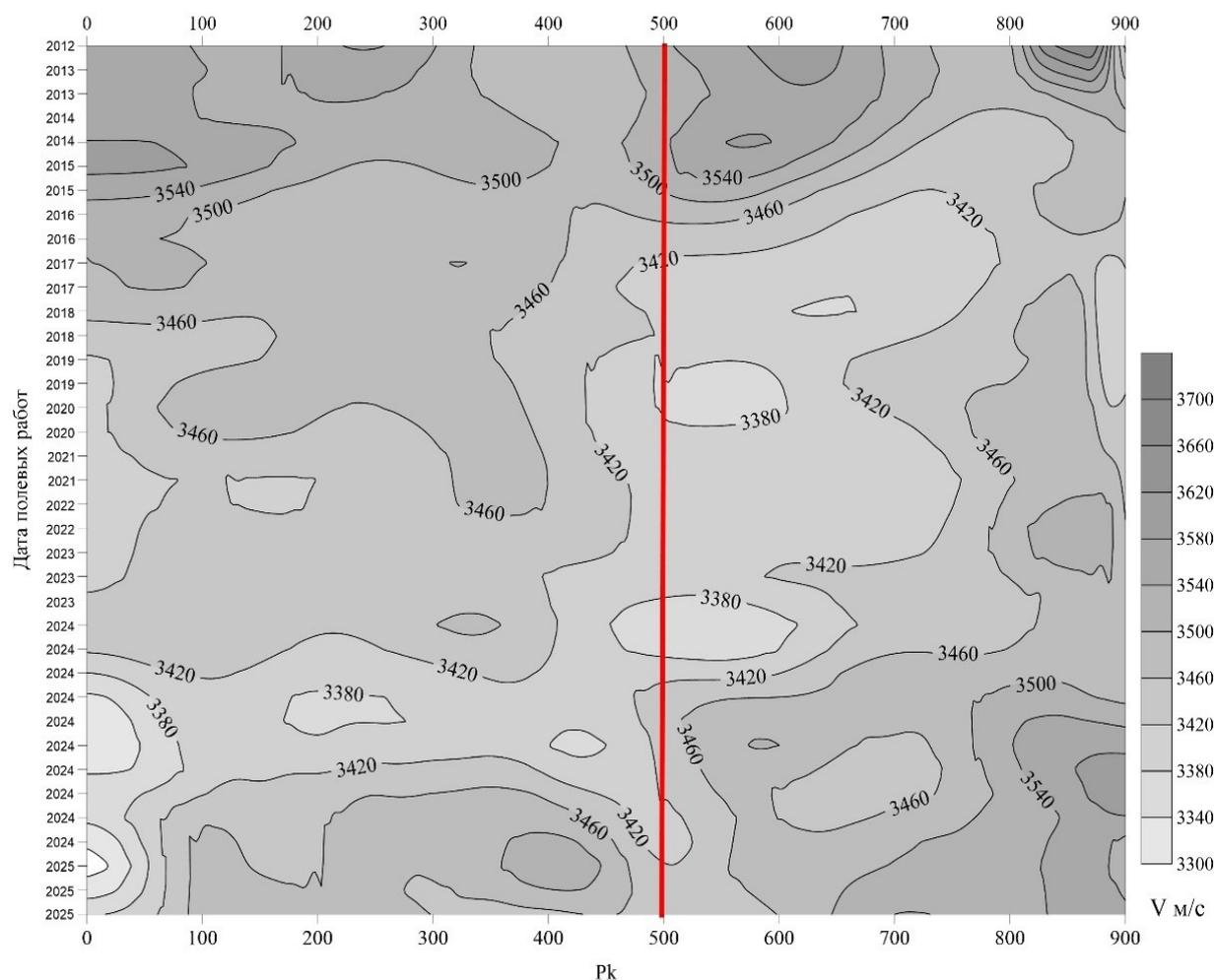


Рис. 6.3. Карта распределения интервальных скоростей EK-SIL

На рисунке 7 приведены графики изменения скоростей в районе 500 м от начала профиля. Здесь видно, как в интервале РР-ЕК скорости снижались с 2022 по 2025 годы. В других интервалах также прослеживаются изменения, но они выражены слабее.

По данным интерпретации, аномальные зоны были впервые отмечены ещё в 2013 году. В 2016 году одна из них немного увеличилась, а в 2019 году зафиксировали локальное снижение скоростей, но это не привело к развитию устойчивой аномалии. Существенные изменения начались в 2022 году – тогда волновое поле явно изменилось в интервале 300-500 м. В 2023 году зона нарушений расширилась на север до 200 м, а в 2024 году – на юг до 600 м. При этом наиболее выраженные изменения постоянно наблюдались в районе пикета 500.

Проведенный численный анализ корреляции разрезов и изменения скоростей подтверждает выводы интерпретации и даёт дополнительную объективную информацию.

Таким образом, численный подход помогает точнее отслеживать изменения в массиве пород и повышает надежность мониторинга.



Рис. 7. Графики изменения интервальных скоростей на 500 Пк

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. О результатах применения малоглубинной сейсморазведки МОГТ на территории ВКМКС // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии: тр. Междунар. геолого-геофизич. конф., 05-08 февр. 2018 г. / ООО «Центр анализа сейсмологич. данных МГУ». – М., 2018. – С. 664-668.
2. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г. Опыт применения сейсморазведки ОГТ для решения инженерно-геологических задач // Геофизика. – 2004. – № 3. – С. 27-30.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 2000. – 480 с.: ил.
4. Санфиров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Прийма Г.Ю., Фатькин К.Б. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.