

РЕЖИМНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИНАХ: ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН РАЗУПЛОТНЕНИЯ, ПРОНИЦАЕМОСТИ И ВТОРИЧНОЙ ГЛИНИСТОСТИ

Егорова А.Б., Горный институт УрО РАН, Пермь

Санфилов И.А., Горный институт УрО РАН, Пермь

Тезиков А.Д., Горный институт УрО РАН, Пермь

В работе представлены результаты режимных геофизических исследований скважин (ГИС), выполненных в 2021-2025 гг. в инженерно-геологических скважинах в пределах шахтного поля затопленного рудника. Целью исследований являлась разработка и апробация методики количественной оценки зон развития вторичных геологических процессов по разрезу скважин. Применён комплекс методов: акустический широкополосный каротаж (АК) с определением V_p и V_s , гамма-каротаж (ГК) и гидродинамические исследования (ГДИ). На основе комплексной интерпретации упругих и радиометрических параметров разработана петрофизическая модель для выделения: 1) интервалов разуплотненных карбонатов (снижение акустического импеданса AI и объёмного модуля упругости K на 25-40%), 2) проницаемых зон (пористость $>10\%$, $\Delta t_{log} > 170,6$ мкс/м, подтверждены ГДИ), 3) зон повышенной суффозионной (вторичной) глинистости ($V_p V_s > 2.2$, объёмный модуль упругости $K < 20$ ГПа, рост ГК на 15-25% и аномально низкий модуль сдвига G). Количественные критерии разделения основаны на пороговых значениях упругих параметров (V_p/V_s , акустические импедансы, модули сдвига и сжатия) и петрофизических параметров (коэффициентов глинистости и пористости).

Ключевые слова: режимные геофизические исследования скважин, акустический каротаж, V_p/V_s , инженерная геофизика, суффозия, карст, Верхнекамское месторождение

Введение

Активное техногенное воздействие, особенно в районах исторической горнодобычи, часто приводит к изменению инженерно-геологических условий, что создаёт угрозу устойчивости существующей инфраструктуры. Затопленные шахтные поля являются зонами потенциального развития опасных инженерно-геологических процессов, таких как суффозия и карстообразование.

Традиционные методы инженерно-геологических изысканий (отбор и испытание керн) обеспечивают точечную информацию о разрезе и слабо пригодны для отслеживания динамики изменений во времени [1]. В этой связи возрастает роль скважинной геофизики, способной предоставлять непрерывные, высокодетальные и воспроизводимые данные о свойствах пород по стволу скважины [2]. Особенно ценным является возможность прямого расчета ключевых динамических упругих параметров – отношения V_p/V_s , акустических импедансов и упругих модулей сдвига и сжатия, которые являются интегральными индикаторами механической целостности, деформационных свойств и напряженного состояния породного массива. Однако до настоящего времени в практике инженерно-геологического скважинного мониторинга

недостаточно разработаны методики, позволяющие не просто фиксировать наличие аномалий, но и осуществлять их дифференциальную диагностику – разделить зоны по степени зрелости карсто-суффозионных процессов: *зоны разуплотнения, проницаемости и суффозионного глинистого заполнения*, что принципиально важно для оценки механизма и стадии развития вторичных процессов [3].



Рис. 1. Схема расположения инженерно-геологических скважин, в которых проводились режимные геофизические исследования с 2021 по 2025 гг.

Материалы и методы

Объект и условия исследований

Работы проводились на участке в пределах затопленного рудника Верхнекамского месторождения калийных солей. Глубина инженерно-геологических скважин – до 80 м. Режимные наблюдения проводились ежегодно в период с 2021 по 2025 гг. (Рис. 1) включительно. Исследования в скважинах выполнялись аппаратурой компании Mount Sopris instrument [4].

Разрез представлен четвертичными отложениями (4-7 м) и терригенно-карбонатной толщей уфимского яруса нижней перми (44-65 м), включающей известняки, глины, мергели [5] (Рис. 2).

Комплекс геофизических исследований

Режимные геофизические исследования в период с 2021 по 2025 гг. (Рис. 1) выполнялись согласно графику задач. Ежегодно проводились изменения акустического каротажа (АК) и гамма-каротажа (ГК) в мониторинговых скважинах, это сформировало непрерывный набор данных изменения упругих параметров и глинистости. Гидродинамические исследования (ГДИ) и инклинометрия (ИНК) выполнялись на

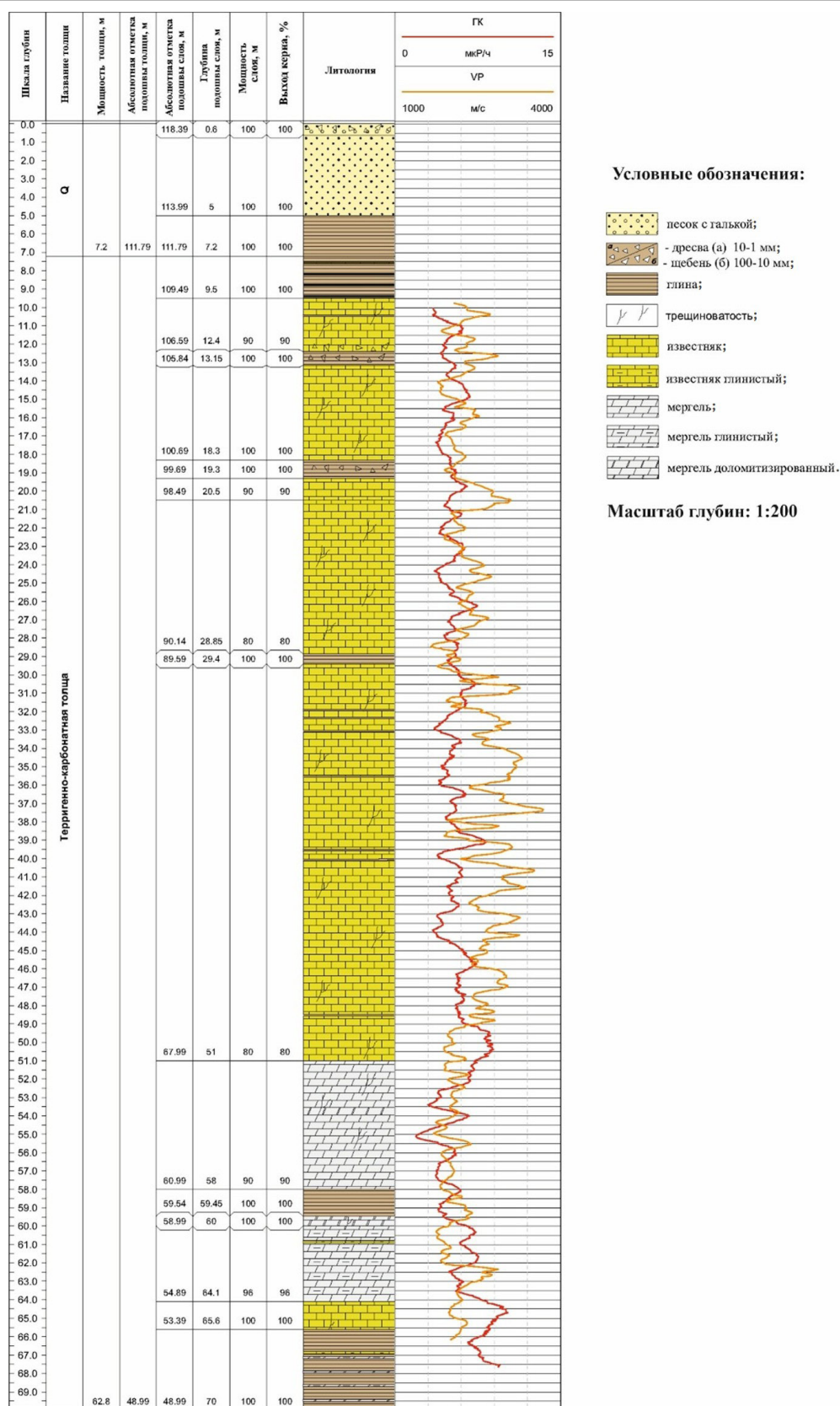


Рис. 2. Сводный геолого-геофизический разрез исследуемых инженерно-геологических скважин

первоначальном этапе для получения базовых фильтрационных характеристик и пространственной привязки ствола скважины. В дальнейшем ГДИ проводились повторно по мере необходимости – при возникновении признаков активизации карсто-суффозионных процессов. Комплекс режимных геофизических методов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Применяемые геофизические методы и решаемые задачи

Метод	Аппаратура	Измеряемые параметры	Решаемые диагностические задачи
Акустический каротаж (АК)	QL40-FWS (full-waveform sonic)	– Интервальное время Δt (мкс/фут) – Скорости V_p, V_s (м/с) – Амплитуда/затухание волн	– Оценка пористости – Расчет упругих модулей – Выделение разуплотненных зон по снижению V_p, V_s – Фиксация затухания как признака глинистости/неоднородности
Гамма-каротаж (ГК)	QL40-GR (NaI(Tl) детектор)	– Естественная гамма-активность (API, мкР/ч)	– Литологическое расчленение (глины/карбонаты) – Расчет коэффициента глинистости (V_{sh}) – Отделение первичных глин от вторичного глинистого материала
Гидродинамические исследования (ГДИ)	Комплекс для ГДИ	– Расход (л/с) – Температура – Удельное электрическое сопротивление	– Прямое выделение водопроводящих (проницаемых) зон – Оценка интенсивности притока /поглощения. – Верификация расчетных фильтрационных параметров
Инклинометрия (ИНК)	QL40-APS	– Зенитный угол и азимут ствола	– Точная пространственная привязка данных АК и ГК – Учет поправок на отклонение ствола

Методы обработки и интерпретации

Обработка данных выполнялась в программном комплексе WellCAD [7]. Для решения поставленных задач использован следующий алгоритм петрофизической интерпретации:

1. Расчет упругих и прочностных параметров

На основе измеренных скоростей V_p, V_s и оцененной объемной плотности породы (ρ) рассчитаны ключевые инженерно-геологические параметры. Расчет объемной плотности породы (ρ) выполнен методом компонент из объемной минеральной модели с калибровкой на лабораторные керновые исследования.

- Отношение (V_p/V_s): $R_{V_p/V_s} = \frac{V_p}{V_s}$ (1)

V_p/V_s характеризует соотношение между скоростями продольной и поперечной волн. Является надёжным индикатором литологии, насыщения и трещиноватости.

- Сдвиговый импеданс (SI): $SI = \rho \cdot V_s \cdot \left(\frac{\Gamma}{\text{см}^3} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}} \right)$ (2)

SI характеризует акустическую «жесткость» породы по отношению к сдвиговым волнам. Чувствителен к минеральному составу скелета породы, пористости и форме

пор, а также к трещиноватости; не зависит от флюидонасыщения (в отличие от продольного импеданса), что делает его ценным для литологического разделения и выявления трещин.

- Акустический импеданс (AI): $AI = \rho \cdot V_p \cdot \left(\frac{\Gamma}{\text{см}^3} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}} \right)$ (3)

AI характеризует акустическую «жесткость» породы и является чувствительным индикатором литологии и пористости.

- Объёмный модуль упругости (K): $K = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3} \cdot V_s^2)$, (Па) (4)

K определяет сжимаемость породы упругой деформации при изменении давления.

- Модуль сдвига (G): $G = \rho \cdot V_s^2$, (Па) (5)

G характеризует сопротивление сдвиговым деформациям.

2. Литологическое расчленение

Литологическое расчленение выполнялось на основе кластерного анализа упругих параметров и объемной рассчитанной объемной глинистости [8] (Рис. 3-5):

- **Глины/Аргиллиты:** высокий ГК, высокое V_p/V_s (>2.2), низкие значения AI, K и G.
- **Мергели:** средний ГК, V_p/V_s в диапазоне 1.9-2.3, промежуточные значения AI, K.
- **Плотные известняки:** низкий ГК, низкое V_p/V_s (1.8-2.0), высокие абсолютные V_p , V_s , максимальные значения AI, K и G.
- **Разуплотненные известняки:** низкий ГК, повышенное V_p/V_s (2.0-2.4) относительно фона, сниженные V_p , V_s , AI, K и G.

3. Выделение проницаемых интервалов (коллекторов):

- Рассчитывалась пористость по калиброванной зависимости [9]:

$$\Phi_{cal} = 0.85 \cdot \left[\frac{(\Delta t_{log} - 47.0)}{(189 - 47.0)} \right] + 0.02 \quad (R^2 = 0.76) \quad (6)$$

- Критерий проницаемости:

$$\Phi_{cal} \geq 10\%, \text{ что соответствует } \Delta t_{log} > 170,6 \text{ мкс/м}$$

Дополнительное подтверждение: снижение модуля сдвига (G) и модуля сжатия (K) в данных интервалах, верификация по ГДИ (Рис. 6).

4. Выделение зон повышенной суффозионной глинистости

Интервалы повышенной суффозионной глинистости выделялись по сочетанию признаков: а) повышенное V_p/V_s (>2.2); б) умеренное увеличение ГК; в) резкое снижение V_s , K и G до значений, характерных для глин; г) приуроченность к водопроводящим зонам по ГДИ.

Это наиболее сложная диагностическая задача, требующая отделения зон, где глинистый материал является первичным (исходные глинистые прослои или мергели), от зон, где он является вторичным (заполнитель трещин и каверн, привнесенный фильтрующимися водами). Для этого предложен комплексный диагностический параметр (КДП), где все параметры нормированы на фоновые значения для плотных известняков [10]:

$$\text{КДП} = \left[\frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)_{norm}}{(GR)_{norm}} \right] \cdot \left(\frac{1}{V_{s_{norm}}} \right) \quad (7)$$

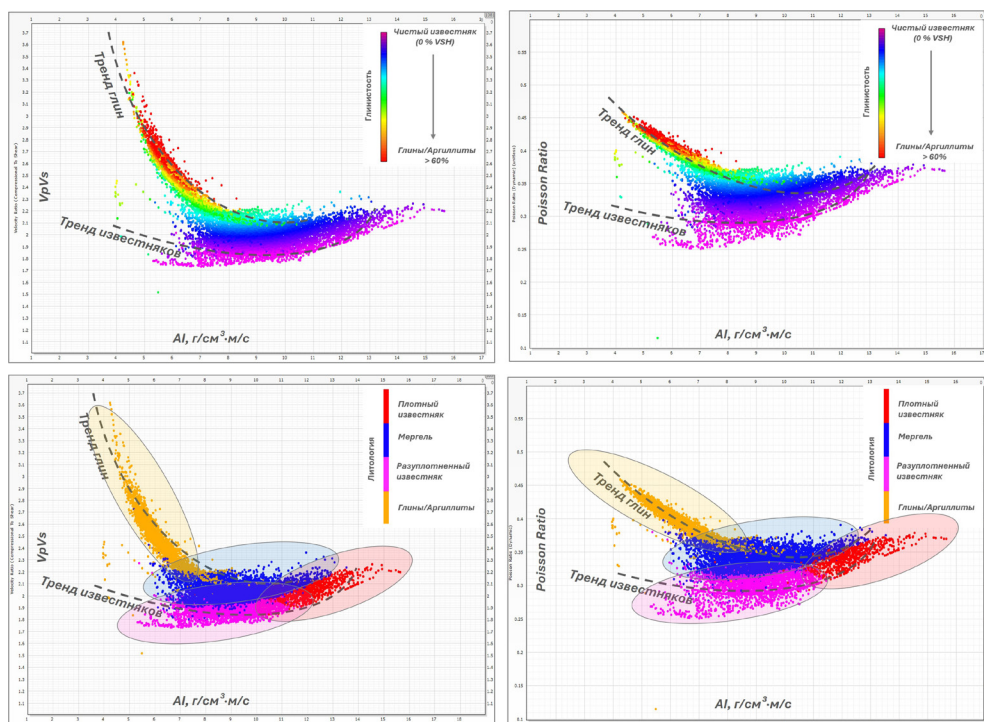


Рис. 3. Кластерный анализ разделения по литологии по упругим параметрам акустического импеданса AI и отношения V_p/V_s

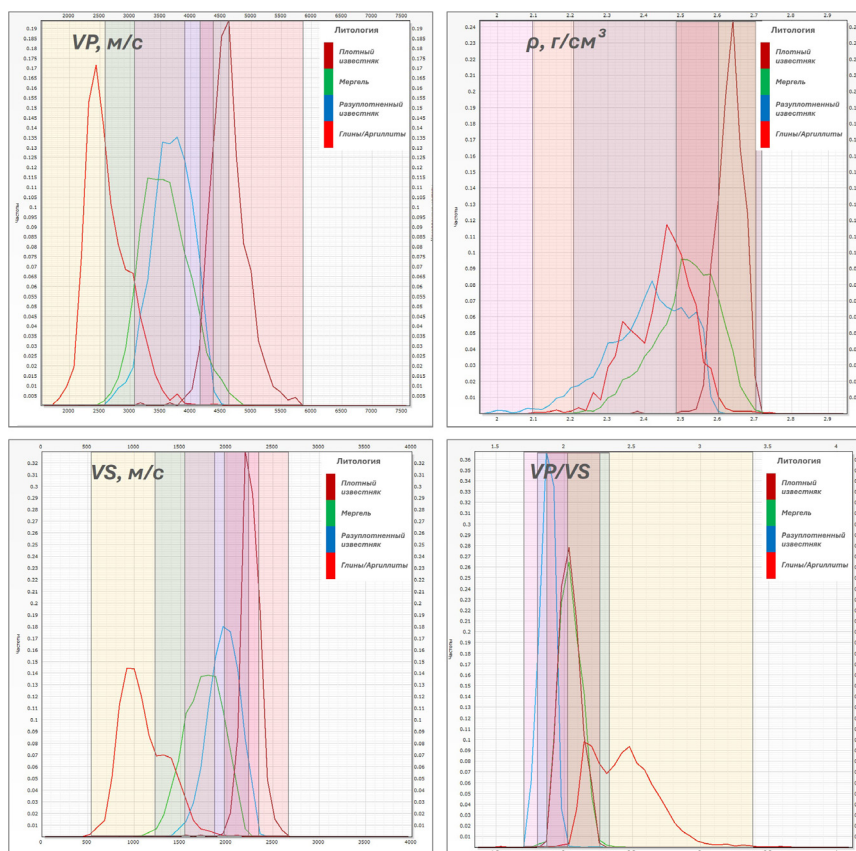


Рис. 4. Кластерный анализ разделения по литологии по упругим параметрам скорости продольной V_p и поперечной волны V_s , объемной плотности ρ и отношения V_p/V_s

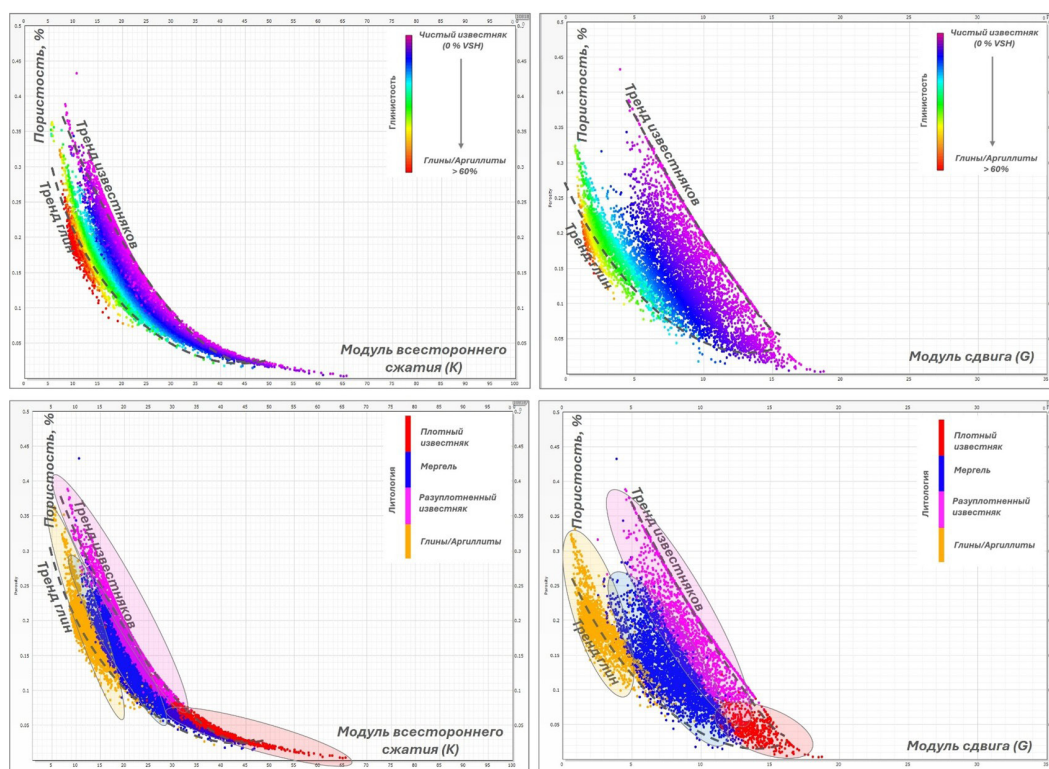


Рис. 5. Кластерный анализ разделения по литологии и глинистости по упругим параметрам. Модуль сдвига G , объёмный модуль упругости (K)

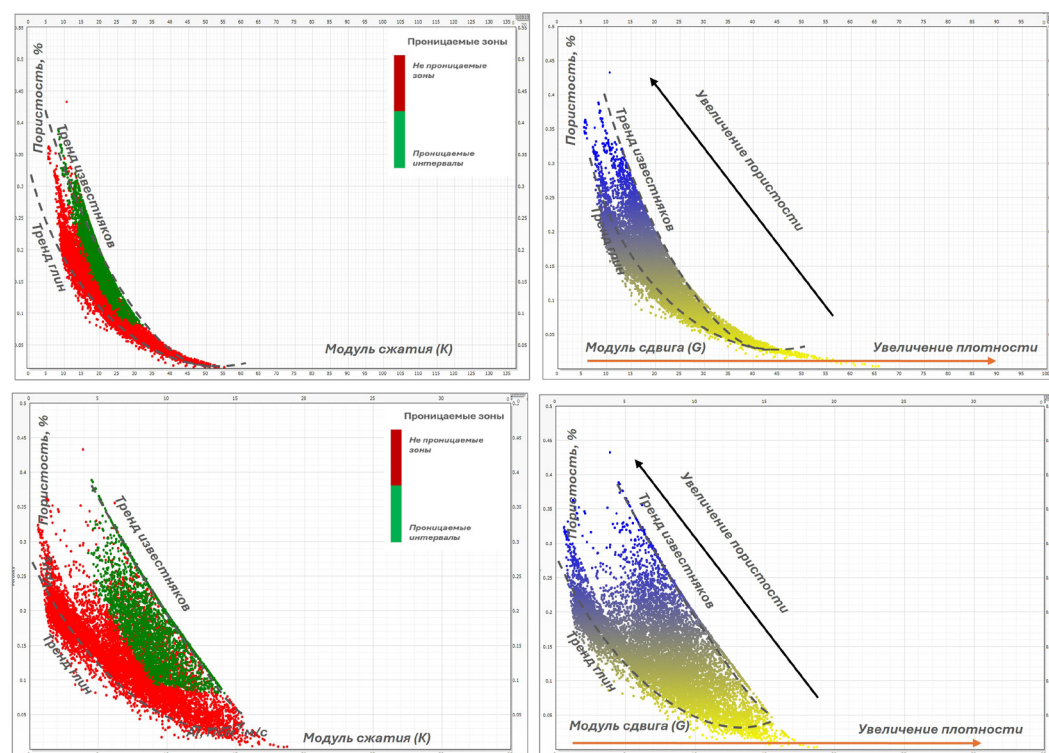


Рис. 6. Кластерный анализ разделения по проницаемости (проницаемые и не проницаемые зоны) и пористости по упругим параметрам. Модуль сдвига G , объёмный модуль упругости (K)

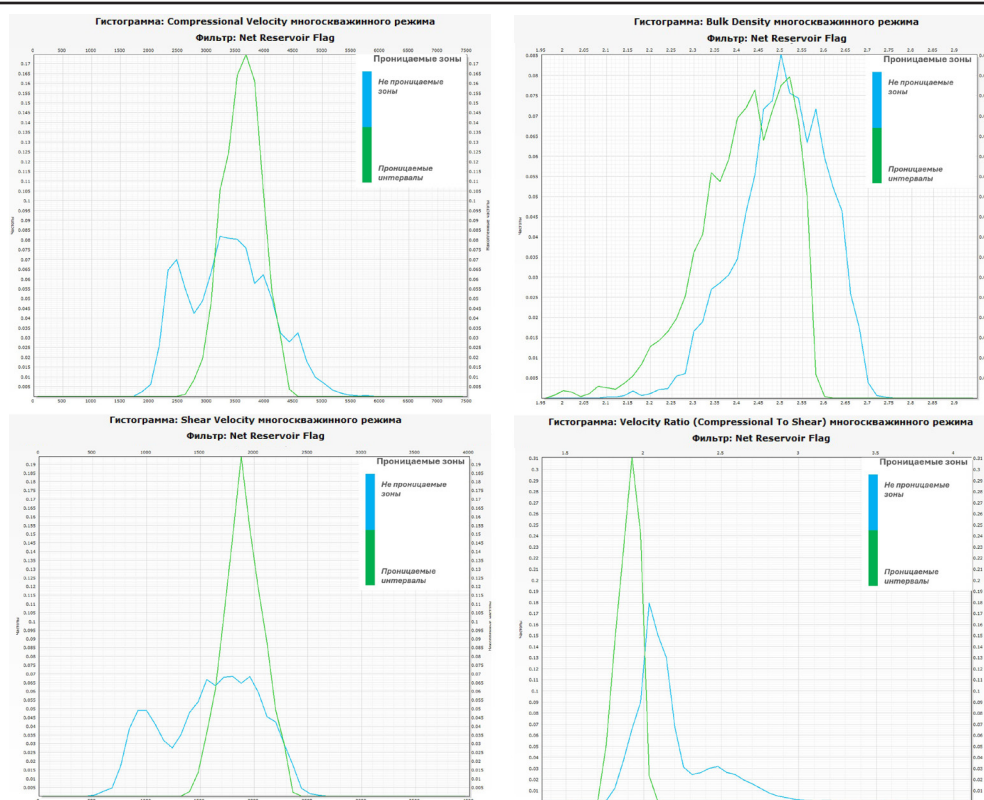


Рис. 7. Кластерный анализ разделения по проницаемости (проницаемые и не проницаемые зоны) по упругим параметрам скорости продольной V_p и поперечной волны V_s , объемной плотности ρ и отношения V_p/V_s

Интерпретация КДП

- **Высокие значения КДП (>1)** указывают на интервалы, где наблюдаемое увеличение V_p/V_s и, возможно, ГК, существенно превышает то, что характерно для первичных глин с аналогичным уровнем ГК, и сопровождается резким падением V_s . **Это диагностический признак суффозионного заполнения.**
- Дополнительными критериями являются приуроченность к водопрводящим зонам по ГДИ, сильное акустическое затухание, пространственная невыдержанность (линзовидный характер аномалии).

Результаты

1. Литологическое расчленение. Кластерный анализ позволил уверенно разделить все четыре типа пород. Интервалы трещиноватых известняков выделены **в скважинах 1х, 7х, 8х, 9х**. Их характерные признаки: кластер точек со сдвигом в область $V_p/V_s = 2.1-2.3$ при низких значениях ГК, а также отчетливое снижение акустического импеданса (AI) и модуля сжатия (K) на 25-40% относительно фона плотных известняков [11] (Рис. 3-5). В скважинах **2х-6х** подобные аномалии незначительны, упругие параметры близки к фоновым, но все же отмечаются.

2. Выделение проницаемых интервалов. Интервалы с пористостью $>10\%$ идентифицированы как проницаемые. Наибольшие мощности таких интервалов и их высокая пористость (до 25-30%) зафиксированы в скважинах 1х, 7х, 8х, 9х (Табл. 2). В скважине 7х проницаемый интервал 41.0-64.3 м, рассчитанный по АК, полностью

совпал с интервалом, где ГДИ выделило 8 водопрводящих зон с притоком ~ 9.8 л/с. В проницаемых интервалах наблюдается закономерное снижение модуля сдвига G , коррелирующее с ростом пористости (Рис. 6-7).

3. Локализация зон повышенной суффозионной глинистости. Анализ совместного поведения V_p/V_s , ГК и упругих параметров позволил выделить интервалы с признаками суффозионного заполнения. Наиболее ярко эти признаки проявились в скважинах 1х и 9х, а также 7х и 8х. Для этих интервалов характерны (Рис. 3):

- максимальные значения V_p/V_s для данных скважин (до 2.4-2.5);
- рост показаний ГК на 15-25% относительно фона плотных известняков;
- аномально низкие значения модуля сжатия (K) и модуля сдвига (G), соответствующие значениям для глинистых пород;
- сильное акустическое затухание;
- пространственная связь с интервалами максимальной рассчитанной проницаемости.

В скважинах 2х, 6х, 4х признаки вторичной глинистости выражены слабее: наблюдается умеренный рост V_p/V_s и незначительное снижение K , но радиационный фон и коэффициент Пуассона меняются мало. В скважинах 2х-6х такие зоны не выявлены, упругие параметры стабильны (Рис. 3-5).

Разработанный алгоритм, включающий расчет и анализ упругих констант, показал высокую эффективность для дифференциальной диагностики типов изменений в карбонатном массиве.

Разуплотненные известняки уверенно отделяются от плотных не только по росту V_p/V_s при низком ГК, но и по отчетливому снижению акустического импеданса (AI) и модуля сжатия (K). Это количественно подтверждает факт разуплотнения и снижения жесткости массива без существенного привноса глинистого материала (Рис. 6-7).

Проницаемые (проводящие) зоны, выделенные по пористости $>10\%$, демонстрируют закономерное снижение модуля сдвига (G), что физически обосновано уменьшением жесткости скелета с ростом пустотности. Полная корреляция с данными ГДИ подтверждает адекватность калибровки акустического метода.

Зоны вторичной глинистости диагностируются по уникальной комбинации: высокое V_p/V_s (следствие резкого снижения V_s глинистым заполнителем), сопутствующий рост ГК, критическое снижение модуля сжатия (E) и модуля сдвига (G) до значений глин. Именно комплексное использование этих параметров позволяет надежно отделить вторичное суффозионное заполнение от первичных глинистых прослоев, для которых характерен высокий ГК, но иные соотношения между V_p/V_s и упругими модулями. Это прямое указание на активный суффозионный процесс – вынос мелкозернистого материала с последующим заполнением трещин, что кардинально меняет деформационные свойства породы.

Пространственное распределение результатов выявило закономерность: наиболее активные процессы (совместное развитие трещиноватости, высокой проницаемости и суффозионной глинистости) сконцентрированы в северо-восточной части изучаемого участка (скв. 1х, 9х) и в его южной части (скв. 7х, 8х). Это позволяет предположить наличие здесь преимущественного направления фильтрационного потока или тектонической предрасположенности. Зоны, где зафиксировано резкое падение модуля сжатия, представляют наибольший инженерно-геологический риск [12] (Рис. 5).

Ограничения методики включают возможное занижение пористости в зонах изолированных каверн и необходимость точной калибровки плотности (ρ) для корректного расчета AI, K, G. Однако использование режимных данных позволяет нивелировать эти ограничения, отслеживая относительные изменения параметров во времени, что повышает надежность диагностики.

Таблица 2

**Результаты петроупругого разделения вторичных изменений
в мониторинговых скважинах**

№ скважины	Интервалы разуплотненных известняков, м	Средняя пористость в коллекторах, %	Среднее значение объёмного модуля упругости (K), ГПа	Признаки суффозионной глинистости	Приток по ГДИ
1х	48.5-52.1; 58.0-62.5	18-22	18-22 (снижен)	Сильные ($V_p/V_s > 2.3$, рост ГК, $E < 20$ ГПа, $\nu > 0.32$)	Отмечен
2х	41.0-64.3	12-15	35-38 (незнач. сниж.)	Умеренные, локальные	Сильный (9.8 л/с)
3х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
4х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
5х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
6х	Отсутствуют	< 10	> 50 (стабильный)	Отсутствуют	Нет
7х	67.5-70.0; 72.0-74.5	20-28	15-25 (снижен)	Сильные	Сильный (9.8 л/с)
8х	59.5-63.0	17-23	25-35 (снижен)	Сильные/ умеренные	Отмечен
9х	50.5-55.0; 60.0-65.5	19-24	15-20 (снижен)	Сильные ($V_p/V_s > 2.4$, рост ГК, $K < 20$ ГПа, $\nu > 0.33$)	Отмечен

Выводы

На основе комплекса режимных АК и ГК разработаны и апробированы количественные петрофизические и геомеханические критерии для отдельного выделения зон трещиноватости, проницаемости и вторичной глинистости в карбонатных отложениях. Ключевую диагностическую роль играют комплексный анализ V_p/V_s , акустического импеданса (AI) и модуля сжатия (K).

Установлено, что наиболее интенсивное комплексное развитие всех трёх типов аномалий, указывающее на активные суффозионные процессы, происходит в районе скважин 1х и 9х, а также 7х и 8х. Для этих зон характерно сочетанное проявление повышенного V_p/V_s , роста ГК, минимальных значений модуля сжатия.

Выделенные проницаемые интервалы с признаками суффозионной глинистости, характеризующиеся одновременно высокой фильтрационной способностью и резко сниженными значениями модуля сжатия ($K < 20$ ГПа), представляют наибольшую инженерно-геологическую опасность, так как указывают на существенную потерю породным массивом несущей способности.

Полученные результаты, включая карты распределения упругих параметров, формируют объективную, физически обоснованную основу для ранжирования территории по степени риска и планирования целенаправленных превентивных мероприятий по инженерной защите.

Библиографический список

1. Глебов С.В. Обоснование рациональных комплексов геофизических исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореф. дис. канд. техн. наук. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2006. – 156 с.
2. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2020. – 710 p.
3. Баяк И.О. Петроупругое моделирование как способ анализа анизотропии упругих свойств в масштабах сейсмических съемок // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – № 2. С. 18–23.
4. Калинин Д.Ф., Смирнов А.В. Акустический каротаж: теория и практика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. – 210 с.
5. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей: монография. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.
6. Иванников А.П., Хмелевской В.К. Гидродинамические исследования скважин: учебное пособие. – М. РГУ нефти и газа, 2015. – 180 с.
7. Алексеев С.Г. Петрофизическое моделирование терригенно-карбонатных разрезов по данным ГИС // Геофизика. – 2022. – № 3. – С. 30–38.
8. Кашиников Ю.А., Ермашов А.О., Ефимов А.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 259–267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259
9. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожеевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород): учебник для вузов. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
10. Чайковский И.И. Основные этапы формирования тектонических нарушений в водозащитной толще Верхнекамского калийного месторождения // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 41–44.
11. Санфиоров И.А., Чугаев А.В., Трапезникова А.Б., Тезикова А.Д. Направления развития сейсморазведочного мониторинга водозащитной толщи действующих соляных рудников // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.04
12. Чугаев А.В. Теоретические основы и практика малоглубинных скважинных сейсмических исследований при эксплуатации месторождений водорастворимых полезных ископаемых: дис. докт. техн. наук. – Пермь, 2024. – 180 с.

Благодарности:

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания «ГИ УрО РАН» (рег. номер 126012716041-5).

Для цитирования:

Егорова А.Б., Санфиоров И.А., Тезиков А.Д. Режимные геофизические исследования в инженерно-геологических скважинах: выделение зон разуплотнения, проницаемости и вторичной глинистости // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 60–71. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.4>

Сведения об авторах:

Егорова Анна Борисовна, инженер, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78А; e-mail: a.b.trapeznikova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3882-6786

Санфиоров Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом активной сейсмоакустики, «ГИ УрО РАН»; e-mail: sanf@mi-perm.ru, ORCID: 0000-0002-9190-4296

Тезиков Артемий Дмитриевич, инженер, «ГИ УрО РАН»; e-mail: artemiitezikov@gmail.com, ORCID: 0009-0000-2115-4875

MONITORING GEOPHYSICAL SURVEYS IN ENGINEERING-GEOLOGICAL BOREHOLES: IDENTIFICATION OF DISINTEGRATION ZONES, PERMEABILITY, AND SECONDARY CLAY ALTERATION

Egorova A.B., Sanfirov I.A., Tezikov A.V.

Mining Institute UB RAS, Perm

This paper presents the results of time-lapse borehole geophysical surveys conducted between 2021 and 2025 in engineering-geological boreholes within the mine field of a flooded mine. The objective of this research was to develop and validate a methodology for the quantitative assessment and dynamic monitoring of zones affected by secondary geological processes along borehole sections. A comprehensive suite of methods was employed, including wideband acoustic logging (for V_p and V_s determination), gamma-ray logging (GR), and hydrodynamic testing (HDT). An integrated interpretation of elastic and radiometric parameters enabled the development of a petrophysical model for the identification of: (1) intervals of decompacted carbonates (reduction in acoustic impedance (AI) and B elastic bulk modulus (K) by 25-40%), (2) permeable zones (porosity $>10\%$, $\Delta t_{log} >170.6 \mu s/m$, confirmed by well testing), and (3) zones of enhanced secondary clay alteration resulting from karst-suffosion processes ($V_p/V_s >2.2$, elastic bulk modulus (K) <20 GPa, 15-25% increase in GR and abnormally low shear modulus (G)). Quantitative discrimination criteria are based on threshold values of elastic parameters (V_p/V_s ratio, acoustic impedances, Young's modulus) and clay content, as well as their temporal variations. The most intensive development of all three anomaly types was recorded in the vicinities of boreholes 1x and 9x, indicating the ongoing progression of secondary geological processes. The results confirm the high diagnostic value of time-lapse borehole geophysics for monitoring engineering-geological hazards in post-mining areas.

Keywords: *Monitoringborehole geophysics, acoustic logging, V_p/V_s ratio, engineering geophysics, suffosion, karst, Verkhnekamskoye deposit*

Поступила в редакцию: 28.05.2026

Принята к публикации: 17.06.2026