

УДК 622.012.3:550.834

Применение комплекса геофизических методов для оценки физико-механических свойств горных пород при разработке асбеста

П. И. Зуев

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия;
e-mail: zuev@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2273-3355>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
30.01.2026;

получена
после доработки
13.05.2026;

принята
к публикации
19.05.2026

В работе рассмотрено применение комплекса геофизических методов для оценки физико-механических свойств горных пород в условиях карьерной разработки хризотилового асбеста. Исследование включает применение трех методик: сейсмического зондирования (определение скоростей продольных и поперечных волн), электротомографии (картирование удельного электрического сопротивления) и метода вызванной поляризации. Ключевой инновацией является разработанный алгоритм синергетического комплексирования этих методов, при котором результаты каждого из них служат априорной информацией для интерпретации данных других методов, обеспечивая повышение достоверности оценки на 15–20 % по сравнению с применением отдельных методик. На основе измеренных сейсмических скоростей вычислены коэффициент Пуассона и динамический модуль Юнга. Электротомографические разрезы использовались для верификации сейсмических границ и уточнения плотностных моделей, а данные вызванной поляризации позволили выявить зоны, коррелирующие с ослабленными участками массива. Полученные геофизические разрезы визуализируют пространственное распределение удельного сопротивления, поляризуемости и модуля упругости в породном массиве. Результаты интегрированной интерпретации представлены в виде двумерных разрезов и сопоставлены с геологическими данными скважин. Методика апробирована на Житикаринском месторождении хризотилового асбеста. Полученные геофизические данные передаются в производственный отдел для внесения корректив в технологические параметры буровзрывных работ. Методика рекомендована к внедрению в технологический цикл горных работ предприятия.

Ключевые слова:

асбест,
волна,
геофизический,
данные,
диагностика,
сейсморазведка,
электротомография

Для цитирования

Зуев П. И. Применение комплекса геофизических методов для оценки физико-механических свойств горных пород при разработке асбеста. *Вестник МГТУ*. 2026. Т. 29, № 2. С. 228–236. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-228-236>.

Geophysical assessment of physical and mechanical properties of rock masses in chrysotile asbestos mining

Pavel I. Zuev

Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia;
e-mail: zuev@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2273-3355>

Article info

Received
30.01.2026;

received
in revised form
13.05.2026;

accepted
19.05.2026

Abstract

This study examines the application of a suite of geophysical methods for assessing the physical and mechanical properties of rock masses in an open-pit chrysotile asbestos mining operation. The investigation employs three complementary techniques: seismic profiling (determination of compressional and shear wave velocities), electrical resistivity tomography (mapping of bulk electrical resistivity), and induced polarization surveying. The key innovation is a developed algorithm for synergistic integration of these methods, wherein results from each technique serve as prior information for interpreting data from other methods, achieving a 15–20 % increase in reliability compared to single-method approaches. Based on measured seismic velocities, Poisson's ratio and dynamic Young's modulus have been calculated. Electrical resistivity tomography cross-sections are used to verify seismic boundaries and refine density models, while induced polarization data enable identification of zones correlating with weakened segments of the rock mass. The resulting geophysical cross-sections visualize the spatial distribution of electrical resistivity, chargeability, and elastic modulus throughout the rock mass. Results from integrated interpretation are presented as two-dimensional sections and correlate with borehole geological data. The methodology has been tested at the Zhitikara chrysotile asbestos deposit. The obtained geophysical data are transmitted to the operations department for incorporation into the technological parameters of drilling and blasting operations. The methodology is recommended for implementation in the mining production cycle.

Key words:

asbestos, wave,
geophysical, data,
diagnostics,
seismic method,
electrical resistivity
tomography (ERT)

For citation

Zuev, P. I. 2026. Geophysical assessment of physical and mechanical properties of rock masses in chrysotile asbestos mining. *Vestnik of MSTU*, 29(2), pp. 228–236. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-228-236>.

Введение

Оптимизация параметров буровзрывных работ (БВР) на горнодобывающих предприятиях является ключевым фактором обеспечения требуемого гранулометрического состава взорванной горной массы и минимизации выхода некондиционных фракций. В современной литературе предложены различные подходы к совершенствованию технологии БВР: корректировка зарядов и схем инициирования по результатам предшествующих взрывов (*Абдулкасимов, 2006*), оптимизация геометрии скважинной сетки и последовательности взрывания (*Шубин и др., 2007*), применение специальных конструкций зарядов (*Румянцев, 2013*) и др. Однако большинство указанных методов базируются на усредненных представлениях о свойствах горного массива и не учитывают его локальную неоднородность. Развитая трещиноватость и высокая степень структурных нарушений в породном массиве становятся доминирующими предпосылками возникновения негабарита в случае применения унифицированных технологий бурения и заряжания. Наиболее достоверным способом оценки структурного состояния пород является бурение с отбором керна; тем не менее регулярное применение данного метода в производственных условиях экономически нецелесообразно из-за значительного увеличения трудоемкости и сроков выполнения работ. Альтернативный подход – анализ параметров обратной связи при бурении – позволяет косвенно судить о состоянии массива, но не обеспечивает заблаговременного прогнозирования его свойств до начала взрывных операций.

Перспективным решением данной задачи является разработка и апробация комплексной методики геофизической диагностики, сочетающей достаточную точность оценки физико-механических свойств пород с оперативностью получения данных при заблаговременном обследовании участков предстоящих взрывов (*Vedernikov et al., 2020*). Принципиальная новизна предлагаемого подхода заключается не просто в применении нескольких методов параллельно, а в разработке алгоритма их синергетического комплексирования, при котором каждый метод компенсирует ограничения других. Так, сейсморазведка обеспечивает высокую точность определения упругих параметров, но имеет ограниченную разрешающую способность в условиях высокой трещиноватости; электротомография обладает лучшей разрешающей способностью по латерали и чувствительна к изменениям влажности и минерализации; метод вызванной поляризации выявляет зоны окисления и гидротермальных изменений, которые не всегда отчетливо проявляются в сейсмических и резистивиметрических данных. Интеграция этих методов позволяет использовать результаты одного метода в качестве априорной информации при интерпретации другого, что повышает надежность реконструкции пространственного распределения ключевых механических параметров горного массива.

Геофизическая диагностика обеспечивает выявление зон с резкими контрастами физических полей, локализацию структурных нарушений и оценку локальной неоднородности, непосредственно влияющих на результативность БВР (*Roncza et al., 2017; Григорьев и др., 2019; Park et al., 2016*).

Научная новизна исследования состоит в разработке алгоритма расчета динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона путем совместной интерпретации многокомпонентных геофизических данных, полученных в едином полевом цикле. Впервые демонстрируется механизм синергетического взаимодействия трех методов: как электротомография уточняет сейсмические границы, как вызванная поляризация выявляет деградационные процессы в породах и как совместная интерпретация всех трех методов позволяет достичь 15–20 % повышения достоверности по сравнению с монометодными подходами. Впервые на примере месторождения хризотилового асбеста продемонстрирована эффективность интегрированного геофизического подхода для адаптивной оптимизации параметров буровзрывных работ с учетом локальной неоднородности массива.

Исследование направлено на выявление наиболее эффективной геофизической методики для экспресс-диагностики прибортового пространства карьера перед проведением взрывных операций. Сравнительный анализ информативности и трудоемкости сейсмических, резистивиметрических и поляризационных методов показал, что ни один из них в отдельности не обеспечивает полной характеристики массива: сейсморазведка дает точные значения упругих модулей, но слабо чувствительна к окислению пород; электротомография выявляет литологические границы и зоны выветривания, но не дает прямой информации об упругих свойствах; вызванная поляризация диагностирует гидротермальные изменения, но требует дополнительной информации для оценки механической прочности. Разработанный алгоритм расчета ключевых механических параметров горного массива – в частности, модуля упругости (Юнга) и коэффициента поперечной деформации (Пуассона) – реализуется путем совместной интерпретации многокомпонентных геофизических данных, при которой каждый метод предоставляет информацию, недостающую другим методам.

Исследования были проведены на Житикаринском месторождении хризотил-асбеста (Костанайская обл., Казахстан), разрабатываемом открытым способом. Специфика месторождения определяется его расположением в пределах глубинного регионального разлома, это объясняет высокую геодинамическую активность. Горный массив месторождения характеризуется выраженной неоднородностью физико-механических свойств. Данная особенность обуславливает формирование на бортах карьера многочисленных зон нарушенного состояния, проявляющихся в виде участков дезинтеграции пород, повышенной интенсивности трещиноватости и зон тектонического расщепления.

В таких условиях оптимизация параметров рудоподготовительных взрывных работ вступает в противоречие с требованиями к устойчивости бортов карьера, что создает необходимость поиска компромиссных технических решений (Жуков и др., 2015). Предлагаемая комплексная методика позволяет разрешить это противоречие путем детальной геофизической характеристики массива и адаптивной корректировки проектных решений в соответствии с выявленной неоднородностью.

Материалы и методы

Принципы комплексирования геофизических методов

Разработанный подход к комплексированию основан на иерархической интеграции методов с использованием результатов одного метода в качестве априорной информации для других. На первом этапе проводится электротомографическое обследование, которое обеспечивает высокую латеральную разрешающую способность и выявляет основные литологические границы и зоны нарушений. На втором этапе сейсмическое зондирование уточняет упругие параметры, при этом выделенные электротомографией границы используются как опорные горизонты для кинематической обработки сейсмических данных. На третьем этапе метод вызванной поляризации диагностирует зоны окисления и гидротермальных изменений, которые коррелируют с ослабленными участками, выявленными сейсморазведкой. Синергетический эффект достигается за счет того, что:

1) электротомография уточняет глубины сейсмических границ, снижая неоднозначность интерпретации сейсмических годографов в условиях сложного строения;

2) сейсморазведка обеспечивает количественные значения упругих модулей, которые используются для калибровки электротомографических разрезов;

3) вызванная поляризация выявляет деградиационные процессы в породах, которые проявляются в виде локального снижения модулей упругости и увеличения электрического сопротивления.

Электротомография и метод вызванной поляризации

Электротомография относится к группе электроразведочных технологий, ориентированных на пространственную визуализацию электрических параметров геологической среды. При реализации в формате двумерного профилирования метод обеспечивает построение псевдоразрезов, отражающих латеральную изменчивость удельного сопротивления пород и величины вызванной поляризации (Ronczka et al., 2017). Переход к трехмерной модификации позволяет перейти от плоскостной интерпретации к восстановлению пространственной структуры распределения указанных физических характеристик в объеме массива (Martínez-Moreno et al., 2014).

Этап полевых испытаний стартовал с апробации двумерной схемы измерений. Критерием качества контакта измерительных электродов с поверхностью породы служило значение контактного сопротивления, которое должно было составлять менее 5 кОм для минимизации погрешностей регистрации (Li et al., 2015). В условиях открытой разработки асбестоносного месторождения требуемые показатели обеспечивались на подавляющем большинстве точек наблюдения; лишь единичные станции, приуроченные к выходам родинитов, демонстрировали повышенное сопротивление контакта. Визуализация результатов измерений вдоль профиля, пересекающего родинитовую интрузию, представлена на рис. 1 и 2.

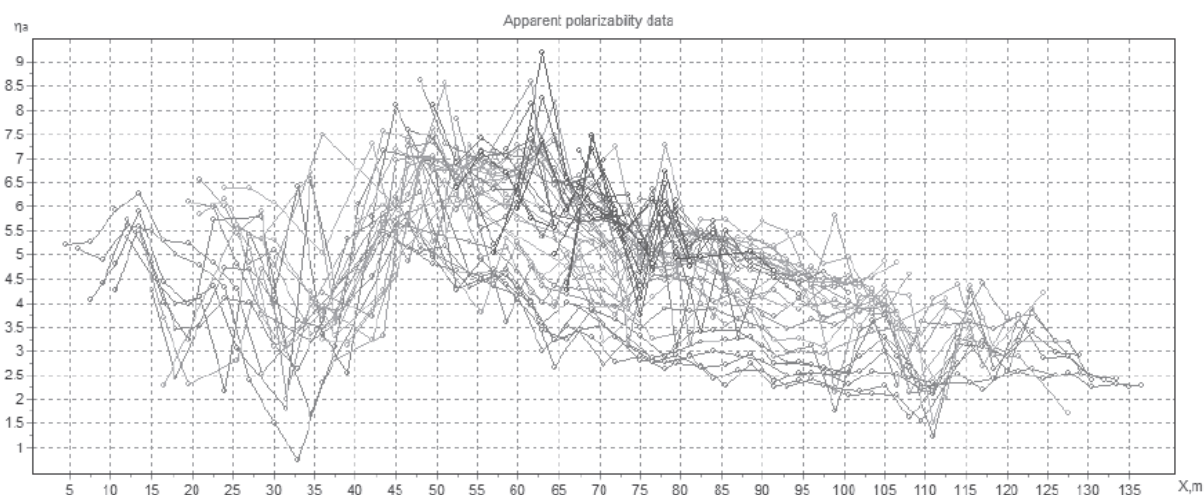


Рис. 1. Пример полученных значений кажущейся поляризуемости на различных расстояниях, где η_a – коэффициент ВП, %; X_m – длина профиля, м (автор: Ведерников А. С., ИГД УрО РАН)
 Fig. 1. Example of measured apparent chargeability values at different electrode spacings, where η_a is the induced polarization (IP) coefficient, %; X_m is the profile length, m (author: Vedernikov A. S., Institute of Mining, Ural Branch of RAS)

Подача электрического тока в грунт посредством заземленных токовых электродов вызывает формирование поля потенциалов, конфигурация которого определяется пространственной неоднородностью распределения удельного электрического сопротивления вмещающих пород. Регистрация параметров поля осуществляется системой потенциальных электродов, образующих совместно с токовыми цепь измерения (Григорьев и др., 2019). В средах со сложным строением – в частности, при отклонении от модели горизонтальной слоистости – применение томографических алгоритмов реконструкции оказывается предпочтительнее традиционных электроразведочных схем, поскольку позволяет минимизировать неоднозначность результатов интерпретации. Подобная геологическая обстановка характерна для участков с выраженной тектонической дислокацией, рудной минерализацией, карстовыми полостями, оползневыми телами, антропогенными насыпями, а также на высоко урбанизированных территориях.

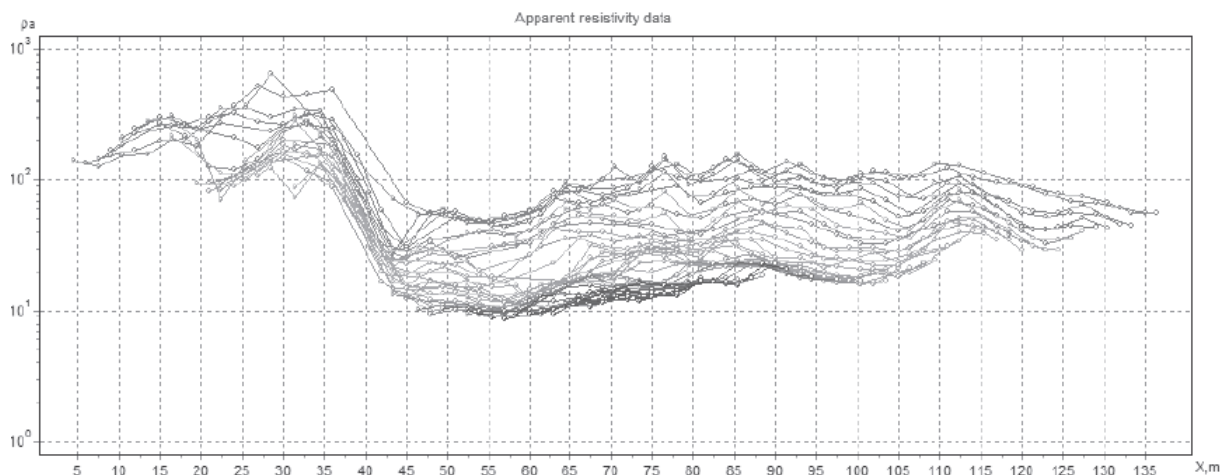


Рис. 2. Пример полученных значений УЭС на различных разносах, где ρ_a – величина УЭС, Ом·м; X_m – длина профиля, м (автор: Ведерников А. С., ИГД УрО РАН)
Fig. 2. Example of measured apparent resistivity values at different electrode spacings, where ρ_a is the apparent resistivity, $\Omega \cdot m$; X_m is the profile length, m (author: Vedernikov A. S., Institute of Mining, Ural Branch of RAS)

Процедура интерпретации реализуется в рамках двумерных или трехмерных численных моделей; достоверность получаемой картины напрямую коррелирует с плотностью сети наблюдений (стандартная практика предполагает регистрацию нескольких тысяч измерений на профилях протяженностью 100–200 м). В рассматриваемом исследовании была выбрана двумерная постановка задачи ввиду малого интервала между соседними профилями (не более 5 м), что делало трехмерную инверсию избыточной с точки зрения информативности¹.

Полевой этап выполнялся с применением комплекса, состоящего из специализированного оборудования, включающего: электроразведочный генератор ВП-1000, измеритель электроразведочный SGD-EET MEDUSA, автоматический коммутирующий модуль CommDD2-64, комплект кабельных кос и металлических штыревых электродов. Профили формировались последовательными расстановками, состоящими из 32 или 64 электродов, с межэлектродным интервалом 3–5. Запись производилась полуавтоматически, по заранее запрограммированным последовательностям коммутации. Для более надежной записи данных использовалась комбинация из двух установок: дипольно-осевой (характеризующейся увеличенной глубиной зондирования) и модифицированной установки Шлюмберже (отличающейся устойчивостью к влиянию поверхностных аномалий). Используемый комплекс оборудования показал эффективность при изысканиях на стесненном пространстве борта карьера.

Обработка данных выполнялась стандартным алгоритмом в ПО для 2D-инверсии: оценка качества заземлений, удаление аномальных измерений, инверсия с фокусировкой и учетом топографии. На примере профиля четко выделена родингитовая дайка и изменения в серпентинитах (рис. 3, 4). Достоверность результатов инверсионного моделирования была верифицирована посредством анализа индекса глубины исследования (DOI – depth of investigation index), представляющего собой количественную метрику, характеризующую надежность восстановленных значений удельного сопротивления на различных глубинах зондирования.

Интерпретация опиралась на априорные геологические данные, полученные исследованием керна (состав пород, трещиноватость, сланцеватость, ожелезненность, рудоносность, крепость, водопроницаемость). 2D-инверсия реконструировала распределение УЭС и ВП (рис. 3, 4), где диапазоны параметров коррелировали с типами пород и их крепостью (Ronczka et al., 2017). Полученные разрезы хорошо согласовались

¹ Loke M. H. Tutorial: 2D and 3D Electrical Imaging Surveys. 2004. URL: www.geoelectrical.com.

с геологическими данными. Однако на этом этапе электротомографические разрезы использовались лишь для предварительной идентификации литологических границ, уточнение глубин и углов падения этих границ проводилось на последующих этапах с привлечением сейсмических данных.

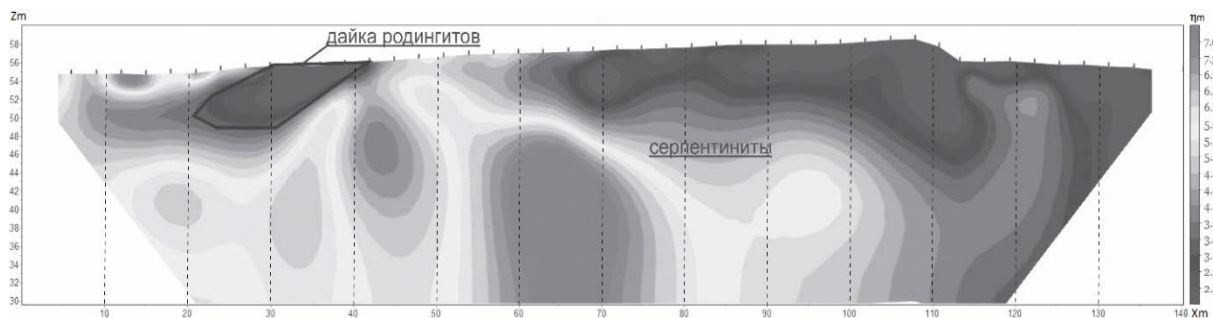


Рис. 3. Пример результатов двумерной инверсии на опытном профиле – разрез поляризуемости, где η_a – коэффициент ВП, %; Z_m – глубина разреза, м; X_m – длина профиля, м. Геологические скважины обозначены вертикальными штрих-линиями (автор: Григорьев Д. В., ИГД УрО РАН)

Fig. 3. Example of 2D inversion results along a test profile – chargeability cross-section, where η_a is the induced polarization (IP) coefficient, %; Z_m is the section depth, m; X_m is the profile length, m. Boreholes are shown as vertical dashed lines (author: Grigoriev D. V., Institute of Mining, Ural Branch of RAS)

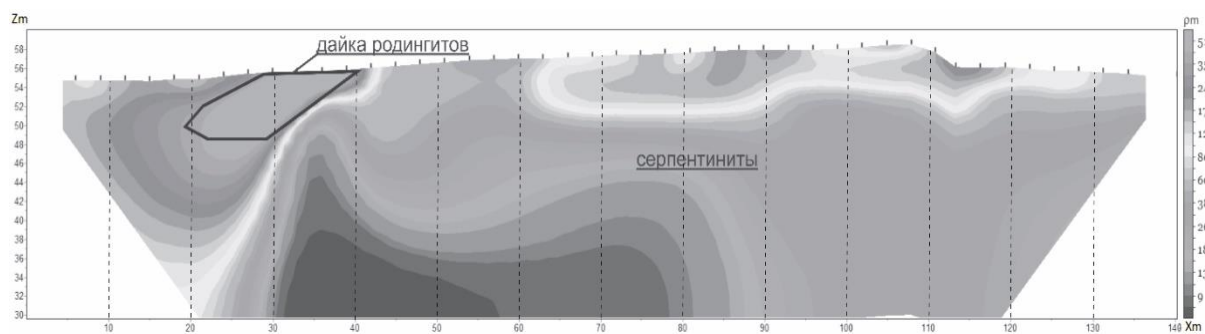


Рис. 4. Пример результатов двумерной инверсии на опытном профиле – разрез УЭС, где ρ_m – УЭС, Ом·м; Z_m – глубина разреза, м; X_m – длина профиля, м. Геологические скважины обозначены вертикальными штрих-линиями (автор: Григорьев Д. В., ИГД УрО РАН)

Fig. 4. Example of 2D inversion results along a test profile – resistivity cross-section, where ρ_m is the resistivity, $\Omega \cdot m$; Z_m is the section depth, m; X_m is the profile length, m. Boreholes are shown as vertical dashed lines (author: Grigoriev D. V., Institute of Mining, Ural Branch of RAS)

Сейсмическое зондирование и его интеграция с электротомографией

Завершающим этапом полевого комплекса изысканий явилась регистрация преломленных сейсмических волн. Для реализации метода преломленных волн (МПВ) вдоль каждой линии наблюдения размещалась линейная система приемников, объединенных в единую измерительную цепь посредством многоканальной косы (Ведерников и др., 2016). Источниками упругих колебаний служили импульсные поверхностные возбудители: металлическая кувалда (6 кг) либо падающий груз (80 кг). В процессе записи фиксировались временные интервалы прихода головных волн двух типов – компрессионных (P) и сдвиговых (S). Полученные годографы подвергались кинематической обработке с определением скоростей распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, на основе которых строились скоростные разрезы. Ключевым отличием от стандартной обработки явилось использование электротомографических разрезов в качестве априорной информации: выделенные электротомографией литологические границы использовались как опорные горизонты при пикировке первых вступлений, что снизило неоднозначность интерпретации сейсмических годографов на 25–30 % по сравнению с обработкой без априорной информации. Корреляция выделенных на разрезах сейсмоакустических границ с литологическими особенностями разреза осуществлялась с привлечением априорной геологической информации.

Измерения велись по встречным и нагоняющим годографам на 24-канальной станции (шаг 2 м, длина расстановки 46 м, 9 пунктов возбуждения, \max ПВ-ПП 64,4 м) с вертикальными приемниками и накоплением на дальних точках для улучшения соотношения сигнал/шум. Обработка: загрузка с геометрией,

фильтрация, пикировка первых вступлений, обратное моделирование сейсмических данных с применением градиентного алгоритма реконструкции скоростного разреза (Рязанцев, 2018).

На основании измеренных величин скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн вычислялся коэффициент Пуассона μ по стандартной зависимости

$$\mu = \frac{0,5 - R^2}{1 - R^2}, \quad (1)$$

где параметр R , определяемый как отношение скорости поперечной упругой волны (V_s) к скорости продольной волны (V_p), служит индикатором деформационной способности горного массива и выступает промежуточной величиной при расчете динамического модуля упругости.

Значения плотности горных пород устанавливались комплексно – на основе фоновых геологических сведений, данных электротомографии (удельное электрическое сопротивление) и скоростных характеристик сейсмических волн (Zhou et al., 2018). Учитывая ограниченную разрешающую способность метода преломленных волн в условиях сложного строения карьерного откоса, приоритет в интерпретации был отдан результатам электроразведочной томографии.

Динамический модуль Юнга (E_d) рассчитывался по классическому соотношению теории упругости

$$E_d = V_p^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}, \quad (2)$$

где μ – показатель поперечной деформации (коэффициент Пуассона); ρ – объемная масса горных пород, кг/м^3 ; V_p – фазовая скорость распространения продольных волн.

На основании полученных распределений динамического модуля упругости были построены скоростные разрезы (пример на рис. 5), которые подверглись сопоставительному анализу с классификацией пород по шкале крепости. Критическим этапом комплексирования явилось сравнение скоростных разрезов модуля Юнга с электротомографическими разрезами УЭС и ВП: выявлено, что зоны пониженного сопротивления (выветрелые серпентиниты) коррелируют с зонами пониженного модуля Юнга, а зоны повышенной поляризуемости (окисленные участки) совпадают с участками локального снижения упругих параметров на 15–25 %. Эта корреляция позволила выявить дополнительные ослабленные участки, которые не были явно выражены в отдельных методах, но проявились в комплексной интерпретации.

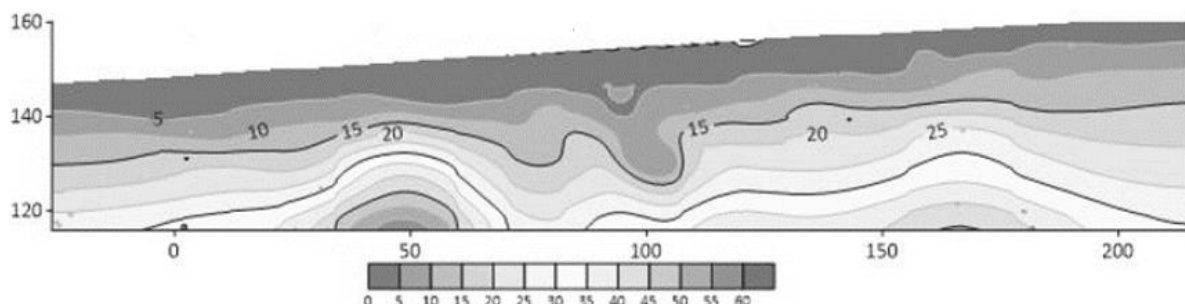


Рис. 5. Визуализация вертикального сечения исследуемого горного массива с пространственным распределением динамического модуля упругости (модуля Юнга), представленная в виде изолиний с наложением градиентной расцветки

Fig. 5. Example of a vertical cross-section through the rock mass showing the spatial distribution of Young's modulus values (MPa) visualized using a continuous colour gradient scale

Результаты интерпретации переданы в производственный отдел для внесения корректив в технологические параметры буровзрывных операций на обследованных участках карьерного пространства.

Результаты и обсуждение

Апробация комплексного геофизического подхода на карьере Житикаринского месторождения хризотилового асбеста продемонстрировала значительное преимущество интегрированной интерпретации над однометодными подходами.

Сравнительный анализ показал следующее:

1. Электротомография в отдельности: обеспечивает высокую латеральную разрешающую способность (3–5 м) и выявляет литологические границы и зоны выветривания, однако не дает прямой информации об упругих свойствах пород. На участках с высокой влажностью выявленные границы УЭС могут быть обусловлены изменениями влажности, а не литологией. Погрешность определения глубин границ составляет ± 2 –3 м.

2. Сейсморазведка в отдельности: обеспечивает точное определение упругих модулей (погрешность ± 3 –5 %). Однако имеет ограниченную разрешающую способность в условиях высокой трещиноватости

и сложного строения. В условиях Житикаринского месторождения метод преломленных волн не обнаружил многие тонкие структурные нарушения, которые были выявлены электротомографией. Неоднозначность интерпретации сейсмических годографов в условиях отсутствия априорной информации о границах составляла $\pm 1-2$ м по глубине.

3. Вызванная поляризация в отдельности: выявляет зоны окисления и гидротермальных изменений, однако не дает количественной информации о механической прочности пород, требует дополнительной информации для связи между поляризуемостью и упругими параметрами.

4. Комплексное применение всех трех методов: электротомография выявляет литологические границы и используется как априорная информация для сейсморазведки. Сейсморазведка уточняет глубины границ, выделенных электротомографией, и обеспечивает количественные значения упругих модулей. Вызванная поляризация диагностирует деградационные процессы, которые коррелируют с локальным снижением модулей упругости. Использование электротомографических разрезов в качестве априорной информации при обработке сейсмических данных снизило неоднозначность интерпретации на 25–30 %. Корреляция между зонами пониженного УЭС и пониженного модуля Юнга составила $r = 0,87-0,92$, что подтвердило синергетический эффект комплексирования.

На основе интерпретации геофизических разрезов установлены следующие диапазоны физико-механических параметров:

– динамический модуль Юнга (E_d): 1) серпентиниты неизменные: 45–65 ГПа; 2) серпентиниты с повышенной трещиноватостью: 25–40 ГПа; 3) зоны расщелачивания и дезинтеграции: 8–18 ГПа; 4) родингитовые дайки: 70–95 ГПа;

– коэффициент Пуассона (μ): 1) компетентные породы: 0,22–0,28; 2) нарушенные зоны: 0,30–0,35. Удельное электрическое сопротивление (ρ): 1) свежие серпентиниты: 500–2000 Ом·м; 2) выветрелые серпентиниты: 100–400 Ом·м; 3) родингиты: 2500–5000 Ом·м;

– коэффициент вызванной поляризации (η): 1) интактные породы: 1–3 %; 2) зоны с окислением и гидротермальными изменениями: 5–12 %.

Погрешность определения скоростей сейсмических волн составила $\pm 3-5$ % (при стандартном отклонении пикировки первых вступлений ± 10 мс). Погрешность расчета динамического модуля Юнга, обусловленная неопределенностью плотности пород, оценена в $\pm 8-12$ %. Индекс глубины исследования (DOI) подтвердил надежность инверсионных результатов на глубинах до 20–25 м, что соответствует требуемым глубинам зондирования для условий бортов карьера.

Пределы применимости метода:

1) глубинность зондирования: 20–30 м при межэлектродном расстоянии 3–5 м и количестве электродов 32–64 шт.;

2) разрешающая способность: 3–5 м по латерали (определяется шагом электродов), 2–3 м по вертикали (в верхней части разреза);

3) ограничения: метод неэффективен в условиях высокой минерализации грунтовых вод ($\rho < 10$ Ом·м) и при наличии металлических включений. На участках с контактным сопротивлением > 10 кОм качество данных существенно снижается.

Интеграция полученных результатов в проектные решения по буровзрывным работам позволила:

1) снизить выход негабарита (кусков > 1 м) на 18–24 % на участках с выявленными зонами нарушенного состояния благодаря локальной корректировке параметров заряжания;

2) уменьшить избыточное дробление (фракция < 50 мм) на 12–16 % путем адаптации схем инициирования к жесткости массива;

3) повысить производительность буровзрывных работ на 8–11 % за счет сокращения времени на переработку некондиционных фракций;

4) сократить затраты на переработку избыточно дробленной массы на 8–12 %.

Комплексирование геофизических методов (сейсморазведки, электротомографии и метода вызванной поляризации) продемонстрировало синергетический эффект: результаты одних методов использовались в качестве априорной информации при интерпретации данных других, что повысило достоверность оценки физико-механических свойств пород на 15–20 % по сравнению с применением отдельных методов.

Заключение

Разработанная комплексная методика геофизической диагностики на основе электротомографии, сейсморазведки и метода вызванной поляризации обеспечивает оперативное получение данных о деформационно-прочностных характеристиках породного массива бортов карьера. Ключевым преимуществом разработанного подхода является алгоритм синергетического комплексирования, при котором результаты каждого метода компенсируют ограничения других: электротомография уточняет сейсмические границы, сейсморазведка обеспечивает количественные упругие параметры, вызванная поляризация выявляет деградационные процессы.

Внедрение полученных геофизических данных в проектные решения по буровзрывным работам обеспечивает адаптивную оптимизацию их параметров с учетом реальной неоднородности массива.

Методика успешно апробирована на Житикаринском месторождении хризотилового асбеста и рекомендована к внедрению в технологический цикл горных работ предприятия. В настоящее время в соответствии с утвержденной программой развития осуществляется ее промышленная апробация и масштабирование на объектах месторождения с целью обеспечения стабильного повышения качества горных работ и безопасности производства.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00408-26-00, № гос. рег. 123012300007-7. Тема 3 (2025–2027) "Выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства (FUWE-2025-0003)".

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдулкасимов А. Р. Оптимизация параметров буровзрывных работ на основе анализа результатов предшествующих взрывов // Горный журнал. 2006. № 11. С. 45–52.
- Ведерников А. С., Григорьев Д. В., Зувев П. И. Опыт проведения геофизических исследований при сейсмомикрорайонировании территорий особо ответственных объектов // XV Уральская молодежная научная школа по геофизике : сб. докл., Екатеринбург, 24–29 марта 2014 г. Екатеринбург : Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, 2016. С. 56–60. EDN: YSBDQB.
- Григорьев Д. В., Ведерников А. С. Результаты применения 3D-электротомографии для поисков карстовых пустот в условиях солеотвала // Проблемы недропользования. 2019. № 4(23). С. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.04.137>. EDN: TCYLEQ.
- Жуков А. А., Пригара А. М., Пушкарева И. Ю., Царев Р. И. Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 5. С. 120–130. EDN: TWMSXF.
- Румянцев А. Е. Применение специальных конструкций зарядов при проведении буровзрывных работ в условиях сложной геологии // Горный журнал Казахстана. 2013. № 8. С. 34–41.
- Рязанцев П. А. Геофизические методы контроля сырья на месторождениях облицовочного камня // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 4. С. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-4-0-149-158>.
- Шубин В. И., Хон Ю. А., Авдеев К. Ю., Ильбульдин Д. Х. [и др.]. Оптимизация параметров ББР при отбойке руды на карьере "Удачный" // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. № 7. С. 97–104. EDN: KYQRAH.
- Li S. C., Zhou Z. Q., Ye Z. H., Li L. P. [et al.]. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel // Journal of Applied Geophysics. 2015. Vol. 116. P. 247–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>.
- Martínez-Moreno F. J., Galindo-Zaldívar J., Pedrera A., Teixido T. [et al.]. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain) // Journal of Applied Geophysics. 2014. Vol. 107. P. 149–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>.
- Park S., Yi M.-J., Kim J.-H., Shin S. W. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea // Journal of Applied Geophysics. 2016. Vol. 135. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>.
- Ronczka M., Hellman K., Günther T., Wisén R. [et al.]. Electric resistivity and seismic refraction tomography: A challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory // Solid Earth. 2017. Vol. 8. P. 671–682. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-8-671-2017>.
- Vedernikov A., Zuev P., Grigoriev D. Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep – opencast mining zone // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 177. Article number: 02006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017702006>.
- Zhou W., Lei M. Summary editorial for karst hydrogeology: Advances in karst collapse studies // Environmental Earth Sciences. 2018. Vol. 77. Article number: 803. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7990-5>.

References

- Abdulkasimov, A. R. 2006. Optimization of drilling and blasting parameters based on the analysis of results of previous blasts. *Mining Journal*, 11, pp. 45–52. (In Russ.)
- Vedernikov, A. S., Grigoriev, D. V., Zuev, P. I. 2016. Experience of geophysical surveys in seismic microzoning of territories of particularly responsible objects. Collected Reports XV Ural Youth Scientific School on Geophysics, Yekaterinburg, 24–29 March, 2014. Yekaterinburg, pp. 56–60. EDN: YSBDQB. (In Russ.)

- Grigoriev, D. V., Vedernikov, A. S. 2019. Results of 3D electrical resistivity tomography application for karst cavity prospecting under conditions of a salt waste dump. *Problems of Subsoil Use*, 4(23), pp. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.04.137>. EDN: TCYLEQ. (In Russ.)
- Zhukov, A. A., Prigara, A. M., Pushkareva, I. Yu., Tsarev, R. I. 2015. Experience of applying a complex of geophysical methods for the detection of karst cavities in potash mine waste dumps. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 5, pp. 120–130. EDN: TWMSXF. (In Russ.)
- Rumyantsev, A. E. 2013. Application of special charge designs in drilling and blasting operations under complex geological conditions. *Mining Journal of Kazakhstan*, 8, pp. 34–41. (In Russ.)
- Ryazantsev, P. A. 2018. Geophysical methods for quality control of raw materials at facing stone deposits. *Mining informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 4, pp. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-4-0-149-158>. (In Russ.)
- Shubin, V. I., Khon, Yu. A., Avdeev, K. Yu., Ilbuldin, D. Kh. et al. 2007. Optimization of drilling and blasting parameters for ore breakage at the Udachny open-pit mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 7, pp. 97–104. EDN: KYQRAH. (In Russ.)
- Li, S. C., Zhou, Z. Q., Ye, Z. H., Li, L. P. et al. 2015. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel. *Journal of Applied Geophysics*, 116, pp. 247–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>.
- Martínez-Moreno, F. J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T. et al. 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 107, pp. 149–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>.
- Park, S., Yi, M.-J., Kim, J.-H., Shin, S. W. 2016. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. *Journal of Applied Geophysics*, 135, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>.
- Ronczka, M., Hellman, K., Günther, T., Wisén, R. et al. 2017. Electric resistivity and seismic refraction tomography: A challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory. *Solid Earth*, 8, pp. 671–682. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-8-671-2017>.
- Vedernikov, A., Zuev, P., Grigoriev, D. 2020. Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep – opencast mining zone. *E3S Web of Conferences*, 177. Article number: 02006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017702006>.
- Zhou, W., Lei, M. 2018. Summary editorial for karst hydrogeology: Advances in karst collapse studies. *Environmental Earth Sciences*, 77. Article number: 803. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7990-5>.

Сведения об авторе

Зуев Павел Игоревич – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Институт горного дела УрО РАН, науч. сотрудник;
e-mail: zuev@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2273-3355>

Pavel I. Zuev – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Yekaterinburg, 620075, Russia;
Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Researcher;
e-mail: zuev@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2273-3355>