ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных

С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Данильев С.М., Секерина Д.Д., Данильева Н.А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271. EDN IEWVBO

Аннотация. В работе рассматривается подход к локализации интервалов развития геомеханических процессов в подземных сооружениях на основе классификации и трансформации данных сейсморазведочных исследований. Предлагаемый подход позволит при интерпретации результатов сейсморазведочных работ выявить интервалы развития трещиноватости, разуплотнения пород, водопритока и других геомеханических процессов. Методика предусматривает формирование матриц продольных (V_p), поперечных (V_s) скоростей и соотношения скоростей (V_s/V_p) вдоль профиля исследований для выполнения последовательной фильтрации. Результаты фильтрации служат основой для формирования банка информативных материалов для дальнейшего проведения классификации. На базе отечественного программного обеспечения КОСКАД 3D реализованы четыре подхода для объединенной цифровой модели параметров V_p, V_s и V_s/V_p. Одним из ключевых элементов в процессе классификации является объединение гридов для повышения вероятности обнаружения интервалов с разнородными идентификационными признаками. Результатом применения данного методического подхода является построение комплексной интерпретационной модели, на которой отчетливо проявляются потенциальные зоны развития геомеханических рисков.

***Ключевые слова*:** классификация; трансформация; скорости продольных волн; скорости поперечных волн; комплексная интерпретация; интерпретационная модель

Поступила: 06.04.2023 ***Принята: 27.12.2023*** ***Онлайн: 13.03.2024*** ***Опубликована: 25.04.2024***

Введение. Современное состояние урбанизированных территорий невозможно представить без интенсивного развития минерально-сырьевого сектора, направленного на освоение и переработку полезных ископаемых. Данный тренд подразумевает наращивание производственных мощностей, разведку и освоение новых месторождений, строительство новых горно-технических сооружений, а также повышение эксплуатационных нагрузок на действующие сооружения. Более интенсивное производство горных работ, проводка новых выработок, формирование отвалов пород и дополнительная пригрузка существующих могут способствовать развитию геомеханических рисков из-за деформирования, перераспределения напряжений и разрушения массивов горных пород. Часто геомеханические процессы, протекающие в массиве пород, носят скрытый характер и визуально не проявляются. Влияние тектонических и эксплуатационных факторов на изменение напряжений в массиве горных пород является весьма актуальной темой исследований последних десятилетий [1]. Поэтому для обеспечения безопасности производства горных работ необходимо своевременно выявлять интервалы формирования зон интенсификации геомеханических процессов, потенциально влияющих на эксплуатационную надежность горно-технических сооружений по причине перераспределения напряжений в массиве пород. Скрытые зоны развития геомеханических явлений, связанные с активизацией тектонических процессов, проявляются в виде развития зон разуплотнения, трещиноватости и выщелачивания. Развитие этих процессов приводит к формированию водопроводящих каналов в массиве пород, увеличивающих водоприток в подземные выработки и выступающих катализатором дальнейшего развития процессов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271
© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

денудации с более интенсивной скоростью, и, как результат, появлению видимых деформаций и повышению рисков при производстве горных работ.

Для прогноза на рудниках выполняется стандартный комплекс работ по геотехническому мониторингу, включающий маркшейдерские наблюдения на опорных реперах, мониторинг сейсмических событий в пределах сейсмопавильонов рудника, гидрогеологический мониторинг. Однако, до появления визуальных и ощутимых деформаций в массиве пород, которые хорошо локализуются по результатам маркшейдерских и гидрогеологическим работ, в теле массива могут формироваться скрытые интервалы деформаций, несущие потенциальные геомеханические риски, своевременное выявление которых возможно на основе привлечения современных геофизических технологий и алгоритмов [2, 3].

Для решения задачи прогноза зон геомеханического риска в работе предлагается проведение подземной высокоразрешающей сейсморазведки на продольных и поперечных волнах. Обработка и интерпретация результатов исследований подразумевает применение алгоритмов трансформации и классификации скоростных разрезов.

На этапе обработки в качестве перспективного набора инструментов можно выделить трансформации исходных данных посредством фильтрации различными методами и классификацию объединенного блока исходных матриц с восполнением отсутствующих или непригодных для последующего анализа данных [3]. Такой подход хорошо изучен в рамках задач интерпретации потенциальных полей, но для трансформации сейсморазведочных данных он носит специфичный характер. Предлагается применение альтернативных способов фильтрации, которые успешно зарекомендовали себя при обработке данных геопотенциальных полей [4]. Данное направление может добавлять новые полезные источники информации, позволит локализовать разуплотненные и ослабленные зоны, формирующие область развития геомеханических рисков в горном массиве, на основе данных профильных сейсморазведочных работ.

Методы. Своевременное выявление нарушенных интервалов в области взаимодействия подземной выработки с вмещающим массивом и в глубину массива, контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) массива возможны на базе развития технологий подземной геофизики. Подземные геофизические исследования на рудниках успешно применяются уже более полувека. Опыт их апробации с учетом современного аппаратурно-технологического прогресса позволяет определить наиболее оптимальные методы геофизики для оценки и прогнозирования НДС массива, позволяющие проводить исследования состояния горно-технических сооружений на принципах минимизации инвазивного воздействия с целью снижения рисков развития новых геомеханических процессов [5-7].

В рамках научно-исследовательской работы на рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений (Норильск) выполнялись комплексные геофизические исследования подземных горных выработок. Комплекс состоял из методов георадиолокации, сейсмических исследований и регистрации естественных электромагнитных эмиссий (ЕЭМИ). Данные метода ЕЭМИ для задач трансформационно-классификационных построений невозможно представить в виде двумерной модели, поэтому трансформации и классификации в рамках данного исследования к этим данным не применяются. Метод георадиолокации также не подвергается трансформации и классификации из-за ограниченной глубинности исследований (до 8 м).

В условиях рассматриваемых геотехнических задач можно сформулировать общие требования к геофизическим методам, предлагаемым для исследований:

- основной вектор исследований преимущественно ориентирован на обследование строения и прогноз устойчивости (нарушенности) породоносного массива кровли выработок [6];
- обследование кровли выработок, находящихся в сложных НДС, геофизическими методами должно проводиться с минимальным инвазивным воздействием, не оказывающим дополнительного деформационного риска;
- в большинстве случаев обследование кровли выработок затруднено наличием густой сети коммуникаций (водопроводы, бетоноводы, кабели и т.д.), поэтому методы геофизики должны обладать способностью получать полезную информацию в данных условиях [8];
- применяемые методы геофизики должны обладать потенциалом для перспективного прогноза НДС и физико-механических свойств массива пород [9, 10].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

С учетом требований, предъявляемых к геофизическим технологиям и возможностям представления данных в виде матриц данных в двумерной области, наиболее оптимальным является сейсморазведочный метод преломленных волн (МПВ) с последующей томографической обработкой данных (ПКМПВ-СТ), несмотря на трудозатраты, связанные со спецификой работ [11-13].

При отработке сейсмических профилей в шахтных условиях по кровле выработок использовались следующие параметры регистрации: шаг пунктов приема (ПП) – 2 м; шаг пунктов возбуждения (ПВ) – 2 м; количество ПП на профиле – 76; упругие колебания возбуждались кувалдой весом 6 кг. Данный тип установки выбран на основе проведения опытно-методических работ и размеров исследуемых областей, соотносящихся с размером бина. Методика проведения сейсмических исследований предусматривает работу с выносами пунктов возбуждения за пределы основной расстановки на 10 м, что способствует получению сейсмических записей на глубину до 50 м. Полевые сейсмические работы выполнены с использованием современной телеметрической сейсморазведочной станции «ТЕЛСС-3» производства ООО «Геосигнал» (Москва). Станция обладает преимуществом, согласно ее техническим характеристикам, перед аналогами для реализации подземных наблюдений, заключающимся в возможности формирования индивидуальной помехозащищенной линии расстановки за счет сегментированной сейсмической косы, соединенной телеметрическими модулями [14].

Обработка сейсмических данных делится на несколько этапов: первый – оценка полевых данных, выполнение первичной фильтрации и усиление исходного сигнала, второй – присвоение геометрии расстановки в локальной системе координат (X, Y, Z), третий – пикировка годографов преломленных и рефрагированных продольных и поперечных волн с последующим расчетом томографических разрезов (V_p, V_s). Томографическое обращение годографов заключается в решении обратной задачи томографии с использованием преобразования Фурье и метода наименьших квадратов, предполагающим минимизацию невязки, когда трассирование лучей подчиняется основным законам геометрической сейсмики с минимальным временем прохождения упругой волны через систему элементарных ячеек [15].

Дальнейшая обработка сейсмических данных заключается в расчете отношения скоростей поперечных и продольных волн и подготовки исходных матриц (V_p, V_s, V_s/V_p) данных (рис.1) для проведения процедуры трансформационно-классификационного анализа сейсмических данных.

Первым этапом трансформации обработанных данных является оценка входных материалов на качество, единство и правдоподобность значений для рассматриваемого объекта исследований. Затем проводится расчет трансформант, включающий такие фильтрации, как осреднение в скользящем окне (Moving Average) с выбранными размерами полуосей эллипса усреднения 5×7 и 15×25 м, при котором наиболее информативные результаты дает минимальный размер осей, принятый за оптимальный; низкочастотная фильтрация свертки (Low-Pass Gaussian) со стандартным размером окна 3×3, среднее абсолютное отклонение (Mean Absolute Deviation – MAD); стандартное отклонение (Standard Deviation), позволяющее оценить разброс значений относительно стандартного для измеренного параметра V_s или V_p (стандартное отклонение – это квадратный корень из дисперсии); расчет горизонтального градиента, позволяющего выявить зоны деструкции по смене характера поля с положительного на отрицательное значение и др. [16]. Основная задача применения фильтрации заключается в подавлении помех и извлечении полезной информации для корректной интерпретации полученных результатов [17]. Более подробная характеристика применяемых фильтраций приведена в таблице.

После формирования рабочего банка, включающего карты рассчитанных трансформант, проводится оценка качества полученных материалов [18, 19]. Отбираются наиболее информативные трансформанты для вовлечения в процессы комплексной интерпретации и классификации преобразованных материалов [20-22].

На втором этапе выполняется классификация с использованием программного обеспечения КОСКАД 3D [23-26]. Для начала загружаются исходные матрицы для значений скоростей продольных и поперечных волн и их отношения. Следующая процедура заключается в восполнении отсутствующих или некорректных значений, которые могли быть ошибочно записаны и не устранены на этапе первичной обработки данных. После восполнения недостающих значений происходит объединение трех «гридов» для применения операции классификации.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271
© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

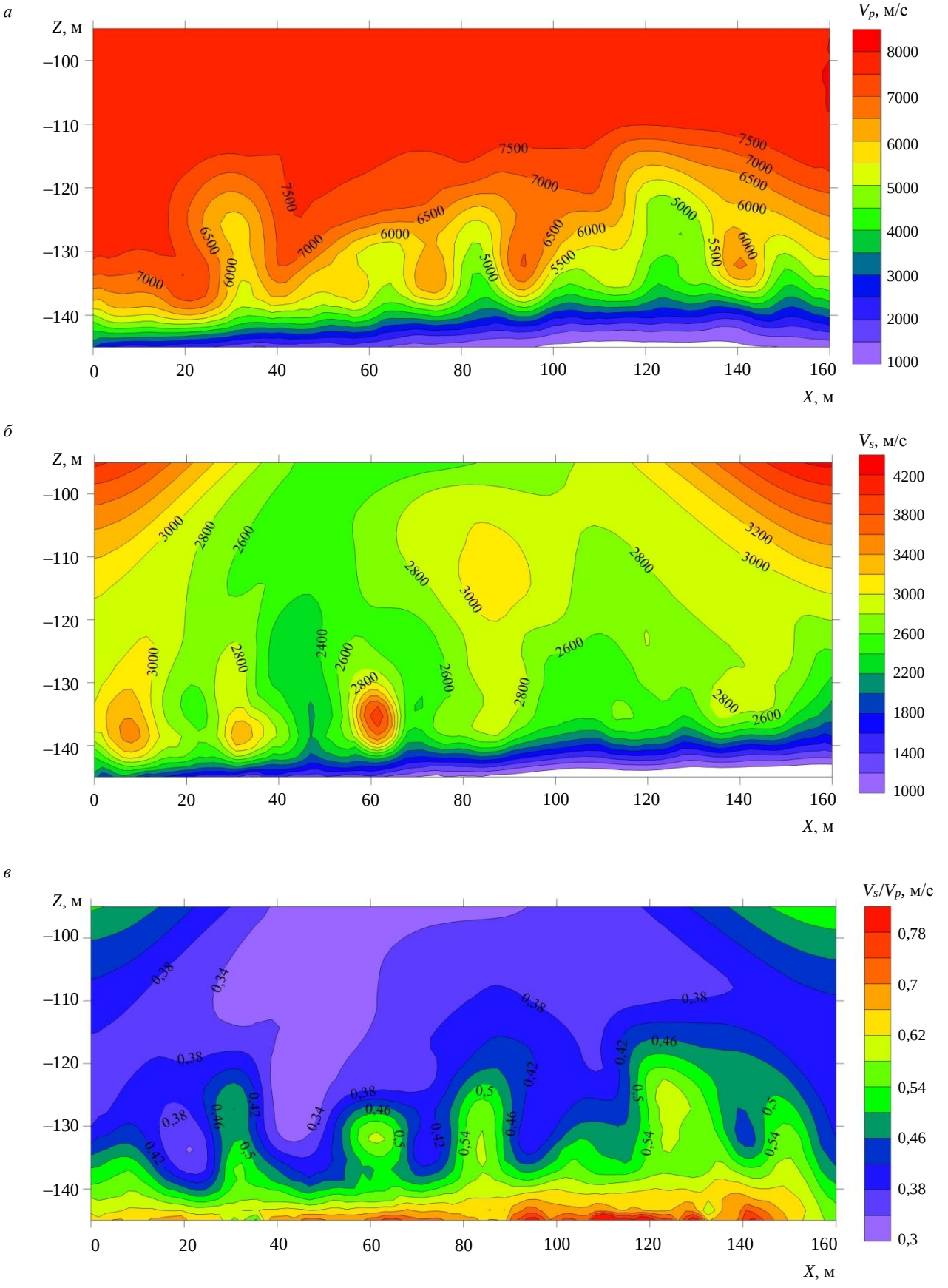


Рис.1. Исходные томографические разрезы продольных (*а*), поперечных (*б*) скоростей и соотношения скоростей (*в*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

Характеристика применяемых фильтраций

Название	Описание	Формула
Осреднение в скользящем окне	Метод построения сетки скользящего среднего позволяет присвоить значения узлам сетки путем усреднения данных в пределах эллипса поиска узла сетки. Из-за специфики данного метода не рекомендуется его применение для карт малого и среднего масштаба, однако данный инструмент полезен при работе с крупным банком пространственных данных, поскольку позволяет выделить региональные аномалии, амплитуда которых зависит от размера задаваемого окна осреднения [13]. Минимальное количество данных задает значение точек при интерполяции узла сетки. Для каждого узла сетки соседние данные идентифицируются путем центрирования эллипса поиска на узле. Значение выходного узла сетки устанавливается равным среднему арифметическому идентифицированных соседних данных [16].	Среднеарифметическое осреднение выполняется с использованием радиально-кольцевой или квадратной палетки, либо в пределах некоторого интервала по формуле $\bar{Z} = \frac{1}{N\sum Z_i}$, где $\bar{Z}$ – среднее значение поля в пределах площади осреднения; Z_i – значение поля в i-м узле палетки; N – общее число узлов.
Низкочастотная операция свертки	Фильтр нижних частот удаляет высокочастотный шум, в результате чего на выходе получается более плавная сетка. При работе с одним из четырех низкочастотных фильтров необходимо учитывать, что ширина и высота окрестности фильтра должны быть положительными нечетными числами [15]. С гауссовым фильтром нижних частот вес уменьшается с увеличением расстояния. Эта весовая функция имеет форму половины общей колоколообразной кривой. Параметр α определяет, насколько быстро вес уменьшается с расстоянием. Чем ниже значение α, тем больший вес имеют точки окрестности в значении сетки и тем медленнее снижается вес. Чем выше значение α, тем больший вес имеет центральная точка в значении сетки и тем быстрее уменьшается вес других точек [17].	При высоте окрестности S и ширине T функция взвешивания расстояния $W(i,j) = \exp\left(-\alpha\left(\left(\frac{i}{S}\right)^2 + \left(\frac{j}{T}\right)^2\right)\right)$; $A_i = -\frac{S}{2},\cdots,\frac{S}{2}$; $A_j = -\frac{T}{2},\cdots,\frac{T}{2}$, где α – положительное значение.
Среднее абсолютное отклонение	Определение характера распределения разницы между абсолютным и средним значениями точек [18, 19] позволяет оценить величину вариации, которая происходит вокруг среднего значения в наборе данных. Эффект этого фильтра заключается в том, чтобы подчеркнуть выбросы в сетке [18]. Недостатком данного метода является ограниченность математической манипуляции по сравнению с дисперсией.	Среднее абсолютное отклонение $\mathrm{MAD} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left\|X_i - \bar{X}\right\|}{n}$, где $\bar{X}$ – среднее значение выборки; n – количество наблюдений в выборке.
Стандартное отклонение	Фильтры статистики моментов – стандартное отклонение (mxn). Значение выходного узла сетки равно стандартному отклонению соседних значений [22].	Стандартное отклонение – это квадратный корень из дисперсии $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2}{n}}$, где x_i – величина отдельного значения выборки; μ – среднее арифметическое выборки; n – размер выборки.

Процедура классификации является составляющей функционального блока «Комплекс» [25], предназначенного для обработки многопризнаковой геолого-геофизической информации [27, 28]. С помощью классификации выполняется разбиение рассматриваемой площади на однородные по нескольким признакам области [29, 30]. Используемые алгоритмы базируются на самообучении с учетом корреляционных связей всего признакового пространства при возможном отсутствии априорной изученности о положении начальных центров и конечном числе классов с однородными признаками.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271
© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

Интересной особенностью данного метода является обрабатываемое поле признаков [31, 32], в котором в качестве исходных материалов могут быть заданы преобразованные матрицы [33], полученные на предыдущем этапе. В результате применения алгоритма формируется сеть, содержащая информацию о классовой идентификации каждой точки. Вовлечение преобразованных материалов в качестве второстепенных входных данных позволяет провести дополнительных отбор наиболее показательных результатов.

С учетом того, что на этапе расчета трансформант происходит подавление и устранение помех и повышение качества данных, и использование улучшенных цифровых матриц позволяет получить более достоверную картину на выходе. Такой подход позволяет включить дополнительные компоненты для формирования классового распределения в многопризнаковом пространстве [34, 35].

Классификация реализуется четырьмя основными методами:

• Метод общего расстояния, при котором конечное число классов выбирается автоматически.

• Метод динамических сгущений (*K*-средних), при котором информация о конечном числе классов задается пользователем, а преобразование выполняется за счет итерационной эмпирической процедуры.

• Метод разделения многомерных нормальных смесей, подразумевающий вариативность задания конечного числа однородных областей с применением многомерного дисперсионного анализа.

• Знаковая классификация, разбивающая исследуемую область на положительные и отрицательные признаки.

Заключительным этапом является интерпретация полученных результатов. Для этого формируется рабочий банк данных, содержащий карты по исходным данным, трансформантам и классификациям в единой привязке [36, 37]. После этого выполняется комплексный анализ априорной и преобразованной информации, по результатам которого выделяются зоны локализации аномальных значений на границах смены характера физических свойств [38-40], которые сопоставляются с физико-механическими параметрами исследуемой среды. На данном этапе отбраковываются аномалии, вызванные краевыми эффектами, и создается обобщенная интерпретационная модель.

Результаты. В результате выполнения сейсморазведочных работ ПКМПВ на рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений (Норильск) получены сейсмограммы общего пункта возбуждения по нескольким профилям. Уникальность методики проведения сейсмических исследований заключается в возбуждении и регистрации упругих волн в кровле горных выработок. Полученные сейсмограммы подвергаются процедурам первичной фильтрации и присвоения геометрии расстановки. На сейсмограммах считываются следующие годографы упругих волн: рефрагированной, преломленных продольных, преломленных поперечных и отраженных. Дальнейшая томографическая обработка данных заключается в обращении считанных годографов упругих преломленных и рефрагированных волн в скорости с использованием преобразования Фурье. Качественная интерпретация предусматривает выделение и прослеживание в разрезе аномальных областей или зон, соотносящихся с различными геомеханическими процессами.

Главными критериями проявления процесса разуплотнения горных пород является снижение скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн. На сейсмотомографических разрезах продольных и поперечных волн области повышенных скоростей идентифицируют участки, на которых возникает напряженное состояние вследствие тектонофизического воздействия, находящего отклик в горных породах.

Еще одним неблагоприятным геомеханическим процессом в горных выработках является повышенный водоприток в шахту, возникающий за счет просачивания воды из вышележащих водоносных горизонтов в области геомеханических процессов деструкции. Характеристика областей потенциальных водопроявлений в шахту на сейсмических разрезах проявляется следующим образом: плавное понижение скоростей распространения продольных волн, понижение скоростей распространения поперечных волн, увеличение соотношения скоростей. На полученных разрезах выделяются аномальные области, характеризующиеся пониженными скоростями продольных и поперечных волн, а также пониженными значениями отношения скоростей в районе пикетов 30-40, 60-70, 80-92, 120-135 м (рис.1), что свидетельствует о наличии областей разуплотнения горных пород в локализованных областях. Дальнейшая количественная интерпретация подразумевает расчет трансформант и классификацию полученных скоростных томографических разрезов [37].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

Полученные в результате применения процедур, указанных в таблице, преобразованные разрезы подвергаются качественной оценке на информативность, а именно, сохранение аномальных областей на разрезах, минимальное искажение исходного массива данных. Этим требованиям удовлетворяют преобразованные посредством осреднения в скользящем окне сейсмотомографические разрезы (рис.2). На разрезах удается отчетливо проследить области со средними и повышенными значениями скоростей, что соответствует зонам напряженности на исходных материалах, области пониженных значений скоростей, разуплотненным горным породам. Наиболее достоверна картина геофизических свойств, проявленных в случае рассмотрения разреза отношения скоростей поперечных волн к продольным [41]. Необходимость отбора самых информативных результатов фильтрации возникает из-за перехода к следующему этапу классификации [39].

Обсуждение результатов. Примеры визуализации результатов классификации по объединенным матрицам V_s, V_p и V_s/V_p представлены на рис.3: *а* – методом общего сгущения, *б* – методом динамических сгущений (*К*-средних), *в* – методом разделения многомерных нормальных смесей (по А.В.Петрову), *г* – методом знаковой классификации. Очевидно, что наиболее информативными результатами являются классификации, выполненные по методу разделения многомерных нормальных смесей (рис.3, *в*) и динамических сгущений (*К*-средних) (рис.3, *б*) ввиду лучшей локализации аномальных областей и их связи с исходными данными [41]. Однако при восполнении недостающих значений сильное влияние на итоговое представление разрезов оказывают краевые эффекты, которые ошибочно можно принять за аномальные показатели при интерпретации. Именно поэтому важно анализировать априорные и преобразованные материалы для исключения некорректных заключений [42, 43].

Метод динамических сгущений (*К*-средних) является эффективным способом классификации многомерных значений в условиях минимума априорной информации о центрах классов за счет использования *К*-средних (где *К*-число классов) [35]. Для всех обрабатываемых признаков оценивается значение среднеквадратичного отклонения, которое также приводится при фильтрации методом стандартного отклонения с использованием нормировки и создания новых векторных центров классов. Главным преимуществом данного метода является быстрая сходимость, недостатком – неполный учет корреляционных связей признакового пространства [23, 44]. Именно классификация способом динамических сгущений выбрана в качестве основы интерпретационной модели как наиболее информативная, поскольку при сопоставлении с априорными разрезами (см. рис.1) аномальные участки весьма достоверно проявляются именно на рис.3, *б*.

Всего на интерпретационной модели выделено восемь классов: 1-й класс отвечает проявлению краевых эффектов и локализации максимальных значений скоростей; 2-й класс характеризует проявление зон механических нарушений или повышенных напряжений; 3-6-е классы подчеркивают контуры распределения основных блоков, характеризующихся однотипными признаками, разбитыми на подгруппы для более удобной идентификации при последующей интерпретации; 7-й класс аккумулирует признаки с пониженными значениями скоростей; 8-й класс накапливает признаки с наиболее картелирующимися показателями. Для непосредственной интерпретации наибольший интерес представляют классы 2 и 8, поскольку именно по ним возможно наиболее достоверно определить зоны локализации напряженных состояний.

Результирующая интерпретационная модель (рис.4) демонстрирует положение аномальных участков по исследуемому профилю, которым соответствуют зоны потенциального превышения нормального деформационного состояния исследуемого массива. Именно эти зоны представляют наибольшую опасность при планировании подземных работ и требуют привлечения дополнительных мер по обеспечению безопасного рабочего процесса с минимизацией экономических и технологических рисков. Сопоставление полученных локализованных зон с материалами первичной изученности, а именно, с визуализированными матрицами продольных и поперечных волн по исследуемому профилю, подтверждает корректность применения методики классификации сейсмических данных по аналогии с геопотенциальными полями [38, 45]. Вовлечение петрофизических характеристик исследуемого массива позволяет выявить закономерности отображения в двумерном пространстве упругих свойств, представленных продольными и поперечными волнами [46, 47].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271
© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

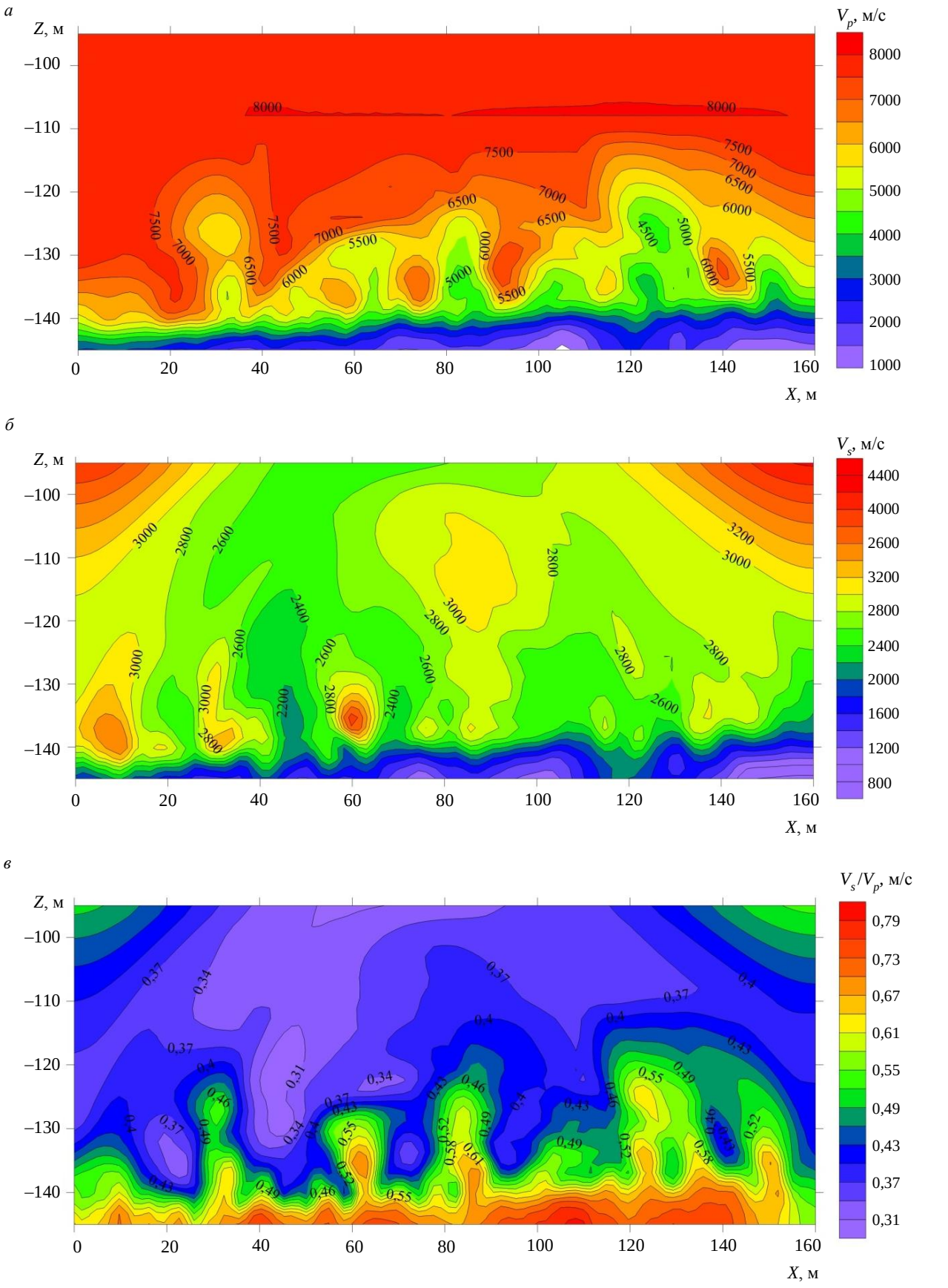


Рис.2. Пример визуализации рассчитанных трансформант методом осреднения в скользящем окне, полученных для матриц продольных (*а*), поперечных (*б*) скоростей и соотношения скоростей (*в*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

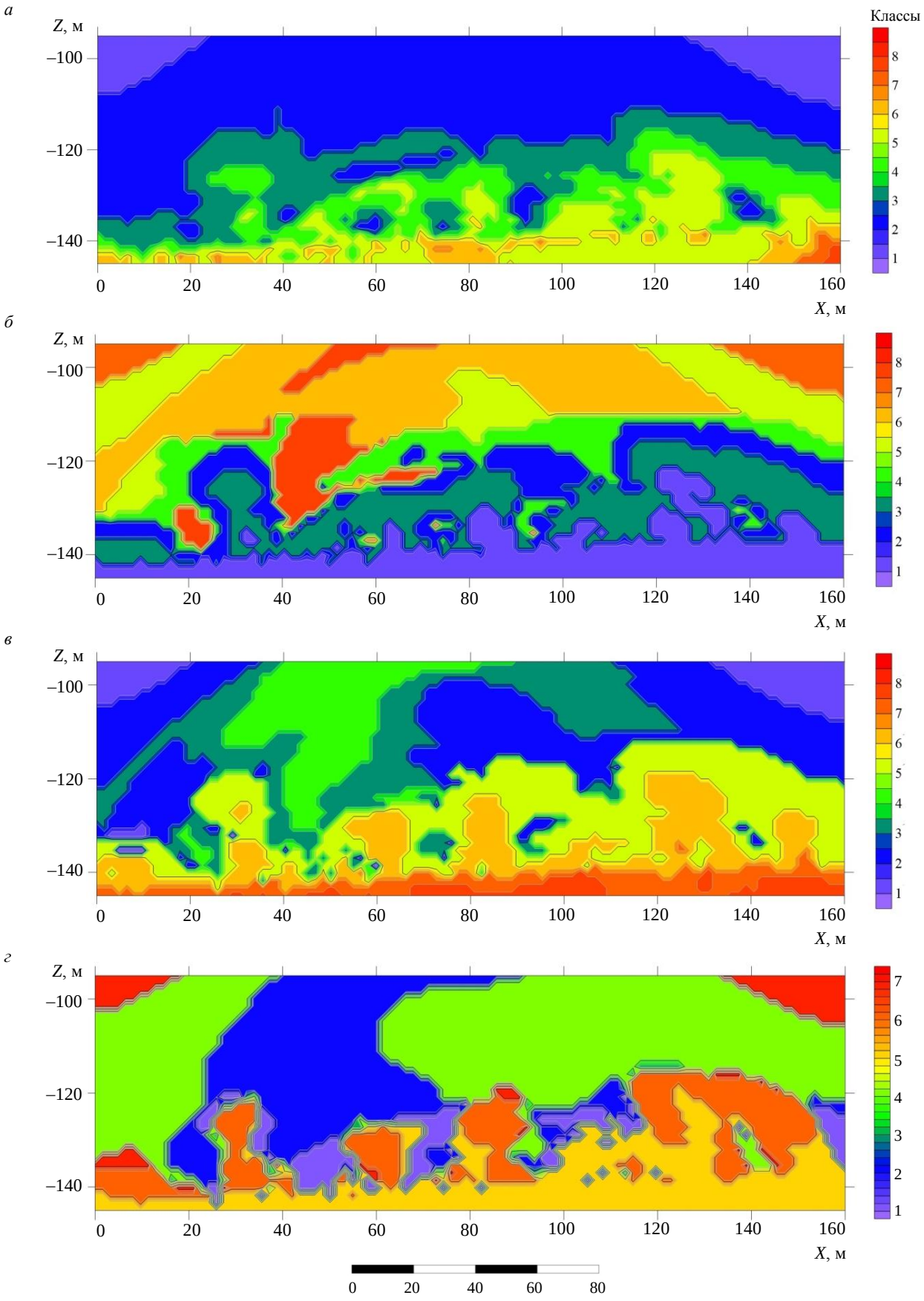


Рис.3. Результаты классификации: *а* – метод общего расстояния; *б* – метод динамических сгущений (*K*-средних); *в* – метод разделения многомерных нормальных сетей; *г* – метод знаковой классификации

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271
© С.М.Данильев, Д.Д.Секерина, Н.А.Данильева, 2024

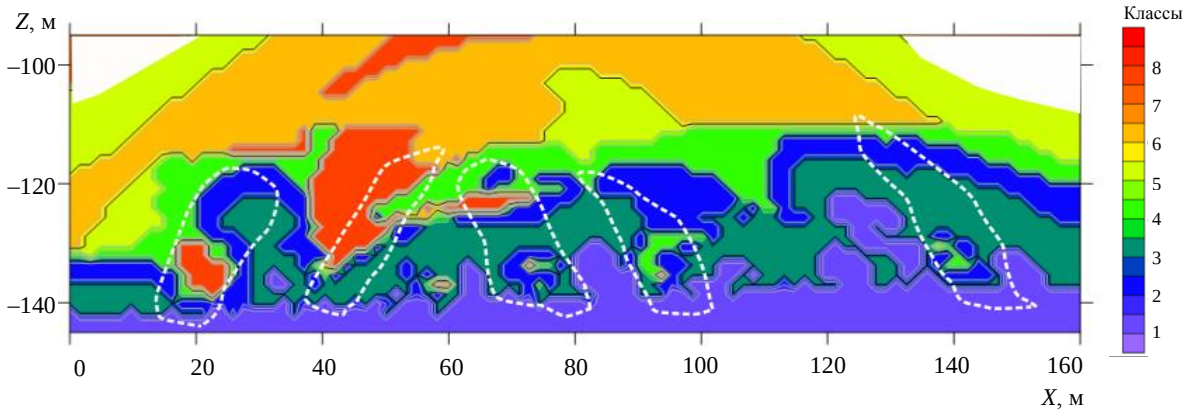


Рис.4. Интерпретационная модель, построенная на основе априорной информации, трансформации и классификации сейсмических данных

Заключение. При прогнозировании напряженно-деформационного состояния массива в рамках планирования горных работ возникает необходимость разработки методологического подхода к исследованию и анализу данных с привлечением дополнительных инструментов. В качестве объекта исследований рассматривались геологические условия рудников Талнахского и Октябрьского месторождений. Исследуемый объект – разрабатываемая подземная горная выработка в осложненных условиях эксплуатации из-за достаточной близости к поверхности и высокой вероятности водопроявлений в шахту по причине развития скрытых геомеханических процессов.

В результате выполнения сейсморазведочных работ опробована технология определения характера распространения упругих волн в кровле горной выработки. Дальнейшая работа заключалась в последовательной выборке качественных данных и апробации методики комплексной обработки и интерпретации сейсморазведочных данных по методике трансформационно-классификационого анализа, применяемого для геопотенциальных полей. Новизна работы заключается в применении эффективных инструментов, которые хорошо себя зарекомендовали при работе с потенциальными геофизическими полями для данных, отражающих упругие характеристики исследуемой среды. Подобная методика является модернизированной и требует дальнейшего тестирования на данных, получаемых в более сложных геолого-технических условиях. Кроме того, полученные результаты демонстрируют потенциальные возможности расширения применения технологий сейсморазведки на этапе обработки и интерпретации по сравнению с привычными подходами к анализу профильных данных в виде сейсмограмм или изображений.

Предлагаемая методика обработки и интерпретации сейсмических данных с последующими трансформациями и классификацией позволяет перейти к составлению интерпретационной модели, отражающей положение контуров наиболее опасных зон (рис.4). Интерпретационная модель может служить основой для планирования безопасного проведения подземных горных работ с учетом выявленных интервалов повышенного геомеханического риска (разуплотненные участки, участки напряженного состояния, обводненные участки).

Таким образом, применение трансформации сейсморазведочных данных в комплексе с методикой классификации при решении задачи локализации аномальных участков, склонным к развитию геомеханических рисков, позволяет оперативно и наиболее достоверно выделить зоны, опасные с точки зрения интенсификации геомеханических процессов. Применение методики трансформации сейсмических данных свидетельствует о перспективности применения современных геофизических технологий при моделировании поведения горного массива с учетом воздействия эксплуатационной и механической нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Деменков П.А., Романова Е.Л.* Анализ подходов к расчету крепи вертикальных стволов в зонах тектонических нарушений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. Вып. 4. С. 223-236.

2. *Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А.* Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. Вып. 4 (64). С. 109-115. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-4-109-115

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Ломов М.А., Константинов А.В.* Анализ результатов сейсмического мониторинга Кукисвумчоррского месторождения // Проблемы недропользования. 2022. № 1 (32). С. 38-44. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.01.038

4. *Чепеленкова В.Д., Лисица В.В.* Применение метода дискретных элементов для оценки прочностных свойств упругих сред // XVIII Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 18-20 мая 2022, Новосибирск, Россия. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2022. Т. 2. № 2. С. 209-214. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-209-214

5. *Dashko R.E., Romanov I.S.* Safety of mining in the Kupol deposit based on the analysis and evaluation of geological processes in underground mine (CHAO, Anadyr District) // Eurasian Mining. 2022. № 1. P. 85-89. DOI: 10.17580/em.2022.01.18

6. *Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И. и др.* Геомеханические процессы в геологической среде горно-технических систем и управление геодинамическими рисками. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. 431 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7

7. *Александров П.Н., Кризский В.Н.* Прямая и обратная задача геоэлектрики бианизотропных сред на основе объемных интегральных уравнений // Физика Земли. 2022. № 3. С. 92-107. DOI: 10.31857/S0002333722030012

8. *Rasskazov I.Ju., Saksin B.G., Potapchuk M.I., Anikin P.A.* The Researches of Burst-Hazard on Mines in Russian Far East // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, Saint Petersburg, Russia. OnePetro, 2018. № ISRM-EUROCK-2018-014.

9. *Ломов М.А., Сидляр А.В.* Оценка факторов удароопасности Николаевского месторождения с помощью системы 3D моделирования результатов сейсмоакустического мониторинга // Проблемы недропользования. 2021. № 1 (28). С. 64-72. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.064

10. *Протосеня А.Г., Иовлев Г.А.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 128-139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139

11. *Kutepova N.A., Moseykin V.V., Kondakova V.N. et al.* Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12. С. 77-93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_77

12. *Lomov M.* 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field // VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources», 8-10 September 2020, Khabarovsk, Russia. E3S Web of Conferences, 2020. Vol. 192. № 04008. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204008

13. *Izotova V., Petrov D., Pankratova K., Pospehov G.* Research of Acoustic Characteristics and Physical and Mechanical Properties of Quaternary Soils // Engineering and Mining Geophysics. 2020. Vol. 2020. 7 p. DOI: 10.3997/2214-4609.202051130

14. *Федотов С.А., Федотов А.С.* Оптимизация технологии сейсморазведочных работ при инженерно-геофизических исследованиях // Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. Современное состояние и перспективы развития, 28 сентября – 2 октября 2015, Сочи, Россия. Сочи: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество, 2015. С. 22-25.

15. *Fengqiao Zhang, Lotfollah Pahlavan, Yuguang Yang.* Evaluation of acoustic emission source localization accuracy in concrete structures // Structural Health Monitoring. 2020. Vol. 19. Iss. 6. P. 2063-2074. DOI: 10.1177/1475921720915625

16. *Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В.* Алгоритмы аппроксимации геопотенциальных полей истокообразными функциями // Геофизика. 2016. № 5. С. 4-10.

17. *Fuentes J.* Unraveling Soft Squeezing Transformations in Time-Variant Elastic Fields // Dynamics. 2023. Vol. 3, Iss. 2. P. 299-314. DOI: 10.3390/dynamics3020018

18. *Bharti A.K., Prakash A., Verma A. et al.* Mapping of decades-old underground coal mine workings using electrical resistivity tomography // Journal of Earth System Science. 2022. Vol. 131. Iss. 4. № 258. DOI: 10.1007/s12040-022-02008-7

19. *Alekseev S.G., Bochkov P.A., Senchina N.P., Shtokalenko M.B.* The Indication in the Potential Fields of Structures Controlling Diamondiferous Magmatism // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia. Springer: Cham, 2019. P. 331-338. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9_38

20. *Shabarov A.N., Kuranov A.D., Kiselev V.A.* Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores // Eurasian Mining. 2021. Vol. 36. Iss. 2. P. 3-7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01

21. *Egorov A.S., Prischepa O.M., Nefedov Y.V. et al.* Deep Structure, Tectonics and Petroleum Potential of the Western Sector of the Russian Arctic // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 3. № 258. DOI: 10.3390/jmse9030258

22. *Секерина Д.Д., Дергилева Е.А., Егоров А.С.* Закономерности локализации структур каледонского и герцинского орогенеза рудного Алтая // Региональная геология и металлогения. 2023. № 93. С. 52-62. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_93_52-62

23. *Schiffer C., Tegner C., Schaeffer A.J. et al.* High Arctic geopotential stress field and implications for geodynamic evolution // Circum-Arctic Lithosphere Evolution. London: Geological Society of London, 2018. Vol. 460. P. 441-465. DOI: 10.1144/SP460.6

24. *Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I.* Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2022. Vol. 380. Iss. 2237. № 20210403. DOI: 10.1098/rsta.2021.0403

25. *Кризский В.Н., Александров П.Н., Ковальский А.А., Викторов С.В.* Математическое моделирование переходного сопротивления катодно-поляризуемого трубопровода по данным магнитометрии // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 1. С. 68-79. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-1-68-79

26. *Рагузин И.И., Быкова Е.Н., Лепихина О.Ю.* Метод полигональной метрической сетки для оценки кадастровой стоимости земельных участков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2023. Т. 78. № 3. С. 92-103. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.8

27. *Керимов И.А., Петров А.В., Абубакарова Э.А.* Применение программного комплекса «Коскад 3D» для анализа потенциальных полей Терско-Каспийского прогиба // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12. № 3. С. 88-96. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-88-96

28. *Богословский В.А., Самохин А.В., Жигалин А.Д.* Экологический мониторинг подземных хранилищ газа геофизическими методами // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 5. С. 465-473.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

29. *Kholmskii I., Eltsov T., Gulin V. et al.* Real Time Monitoring of Seismic Survey Works Using Unmanned Aerial Systems // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. 2022. Vol. 2022. 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.202210988

30. *Архипова Е.В., Жигалин А.Д., Брянцева Г.В. и др.* Особенности долговременных вариаций сейсмичности активных мегаструктур современной Земли // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. № 1 (42). С. 3-12.

31. *Попов М.Г., Попова О.Г.* Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности // Геология и геофизика Юга России. 2021. Т. 11. № 2. С. 152-166. DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011

32. *Bykowa E., Skachkova M., Raguzin I. et al.* Automation of Negative Infrastructural Externalities Assessment Methods to Determine the Cost of Land Resources Based on the Development of a «Thin Client» Model // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 15. № 9383. DOI: 10.3390/su14159383

33. *Фан Т.Х., Петров А.В., До М.Ф. и др.* Особенности геологического строения центральной части Вьетнама по результатам интерпретационной обработки данных гравиразведки в компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020. Т. 63. № 5. С. 77-90. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-5-77-90

34. *Долгаль А.С.* Аддитивные технологии локализации источников геопотенциальных полей // Вестник Пермского университета. Геология. 2019. Т. 18. № 4. С. 380-385. DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.380

35. *Попов М.Г., Попова О.Г.* Изучение изменений во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды // Геология и геофизика Юга России. 2020. Т. 10. № 3. С. 79-93. DOI: 10.46698/VNC.2020.43.14.005

36. *Попова О.Г., Попов М.Г.* Оценка напряженного состояния геологической среды Кавминводского полигона на основе долговременного сейсмо-экологического мониторинга // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 5. С. 15-22. DOI: 10.31857/S0869-78092019515-22

37. *Шабаров А.Н., Зубков В.В., Кротов Н.В. и др.* Выбор проектных решений по освоению месторождений с учетом результатов геодинамического районирования и геометризации опасных зон // Записки Горного института. 2013. Т. 205. С. 66-69.

38. *Балк П.И., Долгаль А.С., Пугин А.В. и др.* Эффективные алгоритмы истокообразной аппроксимации геопотенциальных полей // Физика Земли. 2016. № 6. С. 112-128. DOI: 10.7868/S0002333716050021

39. *Liu Q., Gu Y.J.* Seismic imaging: From classical to adjoint tomography // Tectonophysics. 2012. Vol. 566-567. P. 31-66.

40. *Putikov O., Kholmyanski M., Ivanov G., Senchina N.* Application of geoelectrochemical method for exploration of petroleum fields on the Arctic shelf // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125498. DOI: 10.1016/j.geoch.2019.02.001

41. *Мингалева Т., Горелик Г., Егоров А., Гулин В.* Коррекция глубинно-скоростных моделей методом гравиметрической разведки для труднодоступных участков шельфовой зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-1. С. 77-86. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_77

42. *Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Деев К.В., Большаков Е.М.* ГИС INTEGRO. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения // Геология нефти и газа. 2021. № 3. С. 31-40. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-3-31-40

43. *Черемисина Е.Н., Сеннер А.Е.* Применение ГИС ИНТЕГРО в задачах поиска месторождений нефти и газа // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 3. С. 439-444. DOI: 10.20537/2076-7633-2015-7-3-439-444

44. *Grigorev G., Islamuratov M., Bondarev E. et al.* D-seis: digital field exploration twin // Second EAGE Digitalization Conference and Exhibition. 2022. Vol. 2022. 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.202239010

45. *Zaycev S.V., Ahmetsafin R.D., Budennyj S.A. et al.* Usage of Machine Learning Algorithms for Structural Boundaries Reconstruction Using The Non-Seismic Methods Data with Feature Selection // Data Science in Oil and Gas. 2021. Vol. 2021. 6 p. DOI: 10.3997/2214-4609.202156005

46. *Буддо И.В., Шелохов И.А., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А.* Электромагнитные исследования методом ЗСБ 2D, 3D, 4D: последовательность постановки геологоразведочных работ // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3S. С. 715-730. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3s-0549

47. *Пономаренко М.Р., Кутепов Ю.И., Волков М.А., Гринюк А.П.* Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103-113. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113

***Авторы*: С.М.Данильев,** *канд. геол.-минерал. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0003-3057-8527* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Д.Д.Секерина,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0003-3892-7947* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Н.А.Данильева,** *канд. геол.-минерал. наук, доцент, Danileva_na@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0001-7707-6204* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0