

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД,
РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION,
MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS**

Научная статья

УДК 622

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-68-79

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ПРОГНОЗУ НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА И АПРОБАЦИЯ НА
МЕСТОРОЖДЕНИИ ОЛЕНИЙ РУЧЕЙ**

Синегубов Вячеслав Юрьевич

ООО «Геотехническое бюро»

* для корреспонденции: vs@gtburo.ru**Информация о статье**

Поступила:

30 сентября 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

11 июня 2025 г.

Ключевые слова:

месторождение, напряженно-деформированное состояние, измерение напряжений, натурные измерения, хрупкое разрушение.

Аннотация.

Эффективность и безопасность строительства и эксплуатации любого горного предприятия, а тем более склонного и опасного по горным ударам, напрямую зависит от степени детализации и достоверности прогноза напряженного состояния массива на каждом участке. Статья содержит результаты исследований, направленных на разработку надежного и применимого на практике подхода к изучению и прогнозу напряженного состояния породного массива при строительстве подземных рудников. Приведен анализ последних достижений в области изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород и определены основные проблемы, с которыми сталкиваются исследователи при натурной оценке напряжений. В основу разработанного подхода заложены принципы массовости, точности и подобия измерений, предложенные Ю. Н. Огородниковым. С учетом этих принципов предложен комплексный подход, позволяющий обеспечить глубокий анализ и обобщение геомеханических процессов, происходящих на месторождении, склонном и опасном по горным ударам. Приведена последовательность этапов измерений и обработки информации, а также результаты апробации подхода на примере апатит-нефелинового месторождения Олений ручей, расположенного в Хибинском массиве на Кольском полуострове. Применение подхода позволило дать качественную и количественную оценку начального поля напряжений на месторождении в пределах горного отвода рудника, найти закономерности изменения поля напряжений при увеличении глубины, а также спрогнозировать эти процессы на вновь строящихся и проектируемых горизонтах. Полученные данные совпадают с результатами инструментальных измерений напряжений на руднике, что позволяет сделать вывод об эффективности использования данного подхода.

Для цитирования: Синегубов В.Ю. Разработка комплексного подхода к прогнозу напряженного состояния породного массива и апробация на месторождении олений ручей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 68-79. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-68-79, EDN: HGCOCG

Благодарность

Автор выражает глубочайшую признательность руководителю и специалистам АО «СЗФК» и

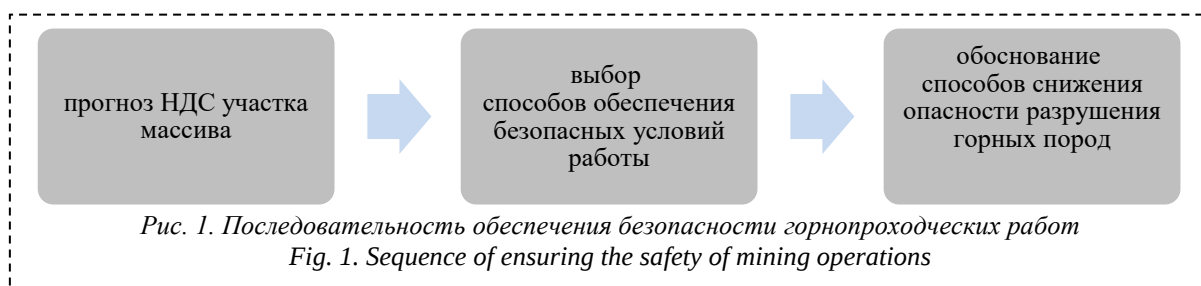
конкретно Браунштейну А. А. за участие в обсуждениях и критическом анализе предлагаемого подхода и получаемых результатов, а также всестороннюю организационную поддержку.

Введение

Современная горная геомеханика с появлением высокопроизводительных вычислительных технологий переживает стремительное развитие, особенно в таких областях, как прогноз изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) при ведении горных работ и прогноз устойчивости элементов систем разработки и горных выработок. Необходимыми для достоверного прогноза НДС являются закономерности изменения, количественные показатели и характер развития процессов деформирования и разрушения горных пород при ведении горных работ различной конфигурации и интенсивности. Прогноз устойчивости элементов систем разработки и горных выработок основан на определении количественных показателей процессов взаимодействия массива с инженерными конструкциями.

Причинами отсутствия развития подходов являются в первую очередь трудоемкость подобных методов оценки напряженного состояния и возможная значительная погрешность [4, 5] ввиду недостаточного анализа горно-геологической обстановки для формирования детального описания НДС массива месторождения.

Таким образом, как показывает практика, несмотря на множество методов измерения и определения напряжений массива в подземных условиях, по отдельности они позволяют лишь локально решать конкретную горную задачу. Углубленный анализ и обобщение процессов, происходящих в массиве при добыче полезных ископаемых, позволят путем решения практических задач обеспечить более высокую производительность в сложных горно-геологических условиях. Основные задачи для этого показаны на Рис. 1.



Достоверность прогноза в первую очередь основывается на качестве исходных данных, в частности, параметров естественного напряженного состояния массива – величин и направлений естественных напряжений и внешних сил в массиве. Теория оценки данных параметров до настоящего времени остается на уровне положений, разработанных во второй половине XX века.

Процессы, происходящие в массивах горных пород, описываются с помощью методов математической статистики и требуют большого количества натурных данных. Однако, согласно многочисленным исследованиям, основное внимание при развитии методов шахтных наблюдений и измерений уделяется практическим аспектам определения напряжений в той или иной точке массива, при этом не предлагается методов перехода от полученных результатов к полной картинке НДС в масштабах рудника, горизонта или локального участка массива. Косвенно данный вопрос рассматривался, например, через изучение горно-геологической обстановки на руднике [1-3], однако в данных работах не представлено подробного описания подходов к интерпретации данных.

В результате проведенных исследований сформирован комплексный подход к изучению напряженного состояния массива горных пород. Предлагаемый подход не только отвечает потребностям подземных рудников, но и обеспечивает результат с минимальными технологическими и экономическими затратами. Эффективность метода показана на примере его использования при оценке естественного напряженного состояния массива на апатит-нефелиновом месторождении.

Анализ существующих методов

Существует несколько десятков методов изучения НДС массивов горных пород [6], которые, в свою очередь, могут иметь несколько способов реализации. Практически каждый из этих методов классифицирован по разным критериям, для них разработаны технологические мероприятия по проведению измерений, обозначены правила и порядок преобразования результатов измерения косвенных измеряемых величин в напряжения.

Например, большинство геомеханических методов определения напряжений в массиве, среди которых выделяются методы частичной и полной разгрузки, скважинные варианты метода разгрузки, позволяют получить непосредственно

напряжения пересчетом в рамках теории упругости, для чего используются усредненные значения упругих характеристик массива. В то же время отсутствует подробное описание порядка и теоретических основ интерпретации получаемых единичных измерений для описания естественного напряженного состояния массива месторождения или хотя бы распространения полученных результатов на ту или иную область массива.

работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Месторождение Олений ручей)», 2015 г.). Причем отмечается [8], что на предыдущих этапах исследований некоторые измерения на менее глубоких горизонтах месторождения в целом подтверждали прогнозные закономерности распределения тензора НДС массива.

Этот факт иллюстрирует еще одну проблему шахтных измерений напряжений в массиве



Это приводит к получению разрозненных в пространстве единичных точек измерения, сложно поддающихся обобщению, значит, обесценивается их вклад в формирование представлений об НДС массива на месторождении. Чаще всего в дальнейшем они могут быть использованы для верификации и уточнения прогнозного распределения напряжений в массиве горных пород. Однако в большинстве случаев прогнозная характеристика, выполняемая на основе предварительной оценки напряжений согласно методическим документам (например, МР-41-06-079-86) и выполненным исследованиям [4, 7], слишком укрупненно рассматривает зависимости распределения полей напряжений и не позволяет достоверно оценивать процессы, происходящие с увеличением глубины и изменением условий.

Данная проблема требует развития теории шахтных измерений напряжений в массиве горных пород. В статье рассмотрен пример месторождения Олений Ручей, где недавние исследования [7] выявили несоответствие тензора напряжений, измеренных «in situ», и прогнозных данных, представленных в регламентирующей документации предприятия («Указания по безопасному ведению горных

горных пород – сложность интерпретации получаемых результатов локальных измерений и отсутствие теоретической основы такой интерпретации.

Методология исследования

Для решения указанных проблем необходимо разработать комплексный подход, позволяющий обеспечить глубокий анализ и обобщение геомеханических процессов, происходящих на месторождении, и содержащий порядок выбора мест проведения измерений для получения достоверных результатов, а также обоснование способов измерений, подходящих для конкретных условий.

Основные условия, которым должны отвечать выбранные методы изучения естественного напряженного состояния массива, основываются на принципах, предложенных Ю. Н. Огородниковым [9, 10], и сформулированы на Рис. 2.

Условие 1 и условие 2 являются в некоторой степени противоречащими друг другу, ведь, как показывает практика [6-8, 11], чем точнее способ натурных исследований, тем менее массовым он может быть, и наоборот. Во избежание этого противоречия предлагается изучение закономерностей формирования напряженного

состояния проводить на массовых показателях; затем точечными методами определения напряжений уточнять и верифицировать полученные результаты; итоговая проверка закономерностей должна проводиться снова на массовых показателях.

Под массовыми показателями понимаются результаты натурных исследований, основанных на способах, позволяющих технологически и экономически проводить многократные измерения на большой выборке натурных моделей, которыми должны преимущественно являться горные выработки [9]. Под точечными методами понимаются любые из известных инструментальных способов определения напряжений в породном массиве [7, 8, 12-15], находящие отражение во многих исследованиях.

Предложенный порядок позволит обеспечить необходимую полноту проводимых измерений относительно всего рассматриваемого участка месторождения; в то же время будет обеспечена требуемая точность получаемой информации.

Условие 3 предполагается реализовывать за счет применения критериев подобия, сформулированных на основе исследований Ю. Н. Огородникова [9], а именно за счет условия однозначности, критериев геометрического подобия и критериев подобия состояния массива. То есть при изучении закономерностей формирования напряженного состояния массива необходимо сопоставлять получаемые результаты на условно подобных участках, условность заключается в том, что на этих участках соблюдаются все критерии подобия, кроме равенства непосредственно определяемого тензора напряжений горного массива. Для определения направлений действия главных напряжений методы исследований должны позволять производить их определение вне зависимости от существующего положения измерительных участков, либо за счет объединения результатов на нескольких участках позволять однозначно определять эти

направления.

Комплексный подход необходимо адаптировать под конкретные условия изучаемого месторождения. Для условий месторождений, склонных и опасных по горным ударам, порядок проведения и обработки измерений выглядит следующим образом:

1. Массовые натурные исследования методом визуально-инструментальной оценки зон хрупкого разрушения вокруг горных выработок (решение обратной задачи по определению напряжений по размерам зон хрупкого разрушения).

2. Уточнение полученных результатов методом торцевой разгрузки керна.

3. Проверка полученных показателей на массовых натурных исследованиях методом визуально-инструментальной оценки зон хрупкого разрушения вокруг горных выработок.

4. Формирование представлений о закономерностях распределения напряжений на месторождении на основе интерпретации данных с использованием теории подобия.

Используемый в качестве точечного метода измерения напряжений метод торцевой разгрузки керна широко известен и описан у многих авторов [2,16], поэтому наибольший научный и практический интерес представляет методология массовых натурных исследований, описанная ниже.

Изучение НДС апатит-нефелинового месторождения

Одним из основных геомеханических факторов, определяющих устойчивость выработок на апатит-нефелиновых месторождениях, является высокая тектоническая напряженность массива горных пород.

Максимальные напряжения действуют субгоризонтально. Кроме того, вокруг очистных зон образуется опорное давление, размеры которого для рабочих горизонтов месторождения могут достигать 40–60 м. Под размером зон

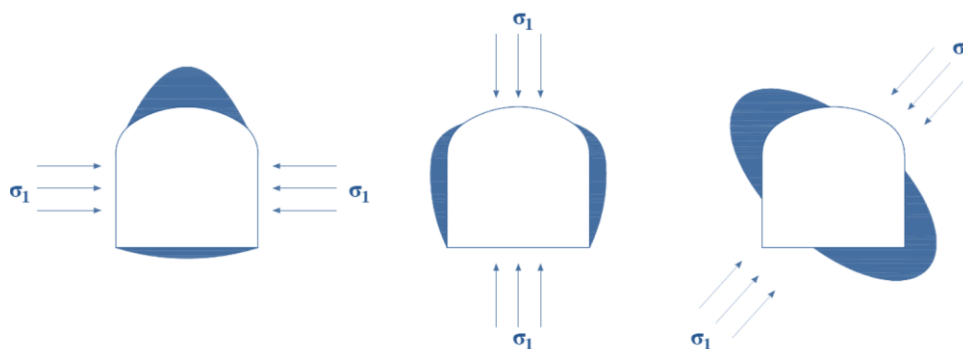


Рис. 3. Формы и зоны разрушения контура выработки в зависимости от направления действия наибольших основных напряжений

Fig. 3. Forms and zones of contour failure depending on the direction of action of the maximum main stresses



a)



б)

Рис. 4. Участок горной выработки в сложных геологических и геодинамических условиях (а) и влияние очистных работ на вышележащем горизонте (б)

Fig. 4. Mining site in complex geological and geodynamic conditions (a) and the impact of stoping on the overlying horizon (b)

опорного давления в условиях апатит-нефелиновых месторождений понимается ширина области повышенного или измененного направления относительно фоновых напряжений массива вблизи фронта очистных работ.

Разрушение контура горизонтальных и наклонных горных выработок в зависимости от направления действия максимальных напряжений показано на Рис. 3.

На Рис. 4 показаны результаты натурных съемок этих проявлений, в выработках видны зоны хрупкого разрушения Λ -образной формы.

Комплексный подход и методология массовых измерений адаптированы в данной статье для условий апатит-нефелиновых месторождений, склонных и опасных по горным ударам, на примере месторождения Олений ручей. Породы месторождения склонны к

хрупкому разрушению. Критериями подобия для условий месторождения Олений ручей назначены:

- прочность руды и породы ($\sigma_{сж}$);
- коэффициент Пуассона (ν);
- параметры тектонического нарушения, влияющего на рассматриваемый участок: литология нарушения и его мощность.

Благодаря тому, что ведение горных работ подразумевает маркшейдерское сопровождение, в частности, маркшейдерские съемки сечений горных выработок, изучение напряженного состояния на основе визуально-инструментальной оценки зон хрупкого разрушения не требует сложных натурных экспериментов и измерений и принципиально состоит из нескольких этапов.

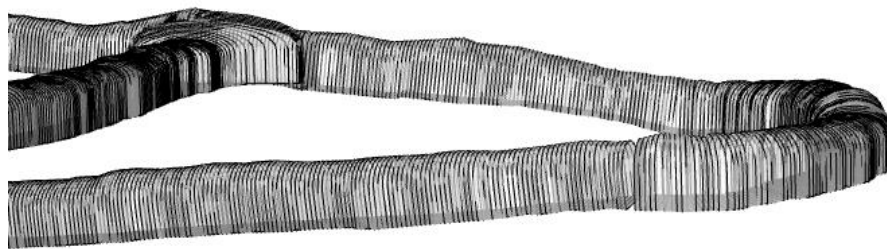
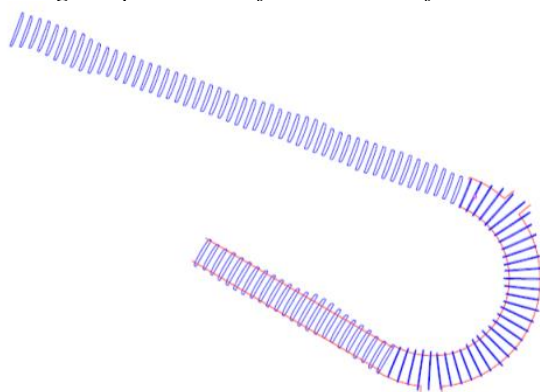
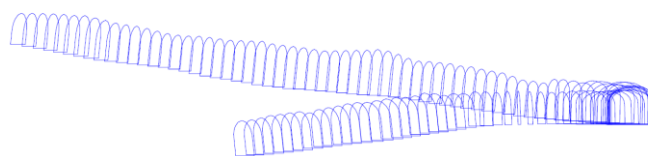


Рис. 5. Пространственный вид трехмерной модели участка автоуклона №2

Fig. 5. Spatial view of the decline drift №2 section



а)



б)

Рис. 6. Общий вид результатов маркшейдерской съемки автоуклона №2 на в районе отм. - 20 м: проекция на горизонтальную плоскость (а) и на вертикальную плоскость (б)

Fig. 6. General view of the decline drift №2 survey on horizon - 20: projection on the horizontal plane (a) and on the vertical plane (b)

1. Замер маркшейдерской службой рудника фактических контуров горных выработок на участках хрупкого разрушения.

2. Определение пространственного расположения конкретных измеренных сечений (угол поворота плоскости сечения относительно севера).

3. Оценка зоны хрупкого разрушения путем вычитания из размеров фактического контура горной выработки размеров по проекту.

4. Вычисление максимального напряжения σ_{max} , действующего в плоскости сечения по зависимости (1), полученной из результатов исследований [17]. Эффективность данной зависимости для апатит-нефелиновых месторождений подтверждена исследованиями [18-21], а также собственными исследованиями автора.

$$\sigma_{max} = R_{сж} \cdot \frac{R_f}{1.25a} - \frac{R_{сж} \cdot 0.49(\pm 0.1)}{1.25}, \quad (1)$$

где R_f – расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения; a –

эквивалентный радиус выработки; σ_1 – главные максимальные нормальные напряжения нетронутого породного массива; σ_3 – главные минимальные нормальные напряжения нетронутого породного массива; $R_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии образца ненарушенной горной породы.

Как видно из зависимости (1), при известных прочностных свойствах массива ($R_{сж}$) и известных проектных и фактических размерах горной выработки (с учетом зоны хрупкого разрушения) вычисление максимального напряжения σ_{max} не представляет практической сложности ни с арифметической точки зрения, ни с точки зрения исходных данных.

5. Аналитическая обработка полученных значений напряжений исходя из положения рассматриваемых сечений, получение картин направлений напряжений и их интенсивности, по которым можно определить максимальные и минимальные главные нормальные напряжения.

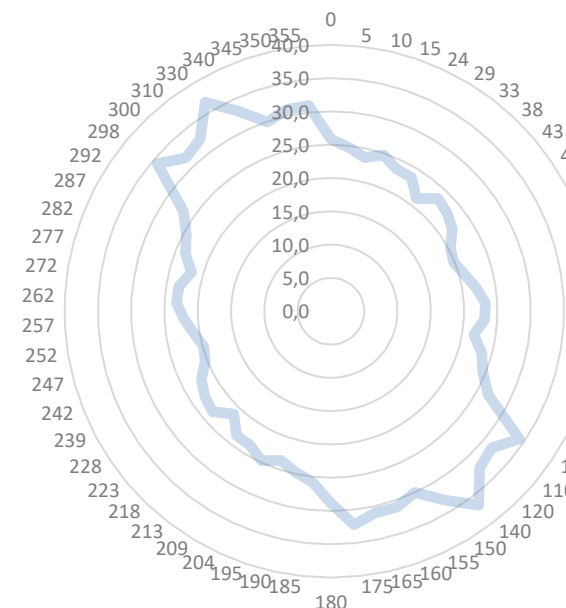


Рис. 7. Круговая диаграмма напряжений: по кругу приведены значения угла отклонения плоскости сечения горной выработки относительно севера в градусах, на вертикальной оси размещены значения напряжений в МПа, соответствующие окружности с данным радиусом

Fig. 7. Circular stress diagram: the circle shows the deviation angle values of the drift cross-section relative to the North, in degrees, vertical axis shows stress values in MPa corresponding to the circle with the given radius

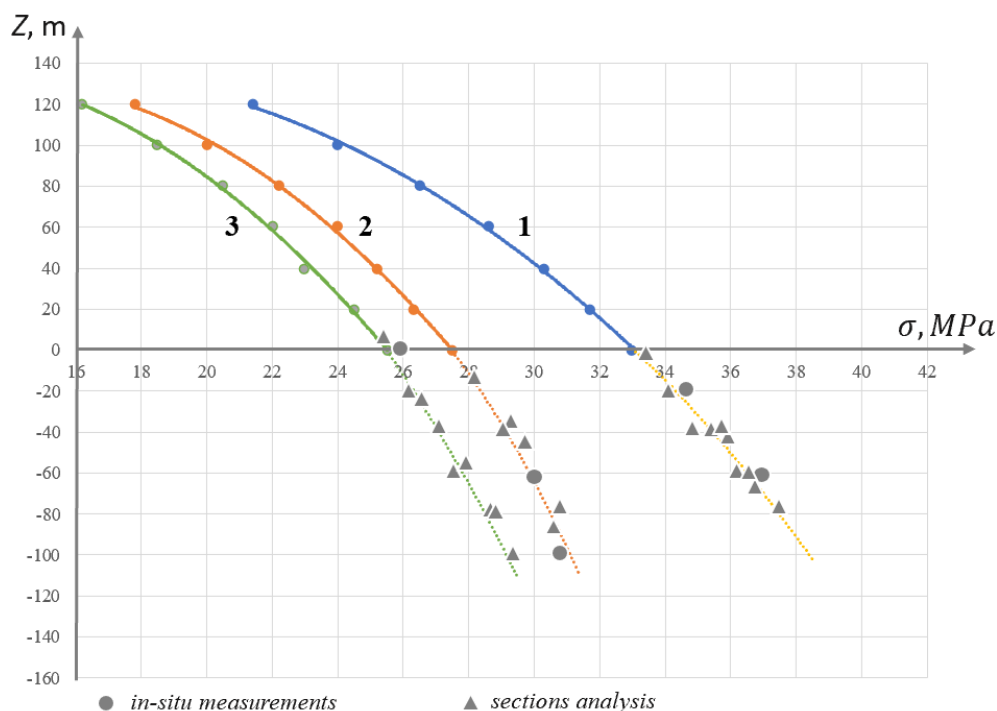


Рис. 8. Изменение наибольших главных напряжений в породном массиве месторождения Олений ручей с глубиной: 1 – зависимость для руд богатой зоны, 2 – зависимость для руд бедной зоны, 3 – зависимость для вмещающего породного массива

Fig. 8. Changes in the maximum main stresses in the rock mass of the Oleniy Ruchey deposit with depth: 1 – dependence for high-grade ores, 2 – dependence for low-grade ores, 3 – dependence for the host rock

Критерии подобия участков соблюдаются за счет применения единых способов строительства горных выработок, а также однотипных горно-геологических условий. Направления

напряжений определяются благодаря измерениям на разнонаправленных участках горных выработок и на поворотах автоуклонов.

В рамках исследования обработано порядка пяти тысяч сечений горных выработок, проведены локальные замеры методами торцевой разгрузки (шесть станций, по три скважины каждой, в каждой станции не менее 5 замеров), а также обработаны результаты других исследований на данном месторождении [7,8].

Ниже приведен пример применения комплексного подхода на участке автоуклона №2 в районе отм. -20 м. Общий пространственный вид автоуклона показан на Рис. 5; схема с разрезами по результатам маркшейдерской съемки показана на Рис. 6.

Для оценки напряженного состояния на участке выработки выполняется оценка исходных данных по сечениям, а именно:

- информация о типе пород вмещающего массива;
- информация о прочности и удельном весе массива;
- проектные высота и ширина горной выработки (согласно Паспорту крепления и управления кровлей).

Затем определяются фактические высота и ширина горной выработки по сечениям, после чего производится расчет максимальных напряжений, действующих в плоскости сечения по зависимости (1). Угол направления действия полученной компоненты напряжения определяется замером угла направления плоскости сечения относительно севера.

Результаты по каждому исследуемому сечению наносятся на круговой график изменения компонент напряжений (для прямолинейных выработок наносят полученные направления на планы горных выработок), представленный для автоуклона №2 на Рис. 7.

Круговая диаграмма показывает распределение компонент напряжений, определенных по размерам хрупкого разрушения, за 0° принято направление на Север. Можно сделать вывод, что максимальная горизонтальная компонента напряжений направлена под углом 130-140° (300-330°), промежуточная компонента направлена под углом 40-50° (210-240°). Значение максимальной компоненты достигает 36 МПа, минимальной – 20 МПа.

Результаты исследования и обсуждение

Визуальная интерпретация, полученная на Рис. 7, позволяет наглядно показать направления наибольших и промежуточных горизонтальных напряжений, а также их значения. Изучение напряженного состояния таким методом на разнонаправленных подобных участках позволяет сформировать картины распределения напряжений всему объему отрабатываемого месторождения.

Успешный пример реализации в виде графиков изменения наибольших главных

напряжений для месторождения Олений ручей представлен на Рис. 8. Графики показывают усредненные значения напряжений для участков, не относящихся к области тектонических нарушений. Фактические значения напряжений могут отличаться в пределах 5 МПа как в большую, так и в меньшую сторону, что связано с возможной погрешностью, предусматриваемой зависимостью в формуле (1).

Также определено основное направление действия главных нормальных напряжений, а именно установлено, что в массиве пород месторождения вне зоны влияния очистных работ максимальные сжимающие напряжения действуют в направлении по азимуту 120-150° (укрупненно можно считать, что в нетронутом массиве они направлены вкострест простирания рудного тела).

В местах концентрации напряжений, связанных с блочной структурой месторождения, значения напряжений могут увеличиваться в 1,5-1,8 раза и имеют направленность, в первую очередь определяемую геометрическим положением тектонических нарушений, это также определено натурными измерениями путем выделения горных выработок на таких участках в отдельную группу натуральных моделей, одинаковую по всем критериям подобия.

Стоит отметить, что полученные результаты позволили не только оценить напряженное состояние на разрабатываемых рудником горизонтах, но и сформировать представление о возможных значениях напряжений на перспективных горизонтах.

Таким образом, предложенный комплексный подход к изучению и прогнозу напряженного состояния массива позволяет на основе натуральных визуально-инструментальных исследований, анализа существующей на предприятии маркшейдерско-геологической информации изучать существующее поле напряжений, сформированное на месторождении, а также прогнозировать его с развитием горного предприятия. В подходе может использоваться широкий способ методов натуральных измерений напряжений, методы теории подобия и другие способы анализа. Подход может быть реализован на любом месторождении, основной задачей для конкретного предприятия станет выбор наиболее достоверных методов измерений на основании трех условий (массовости измерений, точности измерений, локализации подобных участков измерений). Формулирование для каждого месторождения критериев подобия (условия однозначности, критериев геометрического подобия и критериев подобия состояния массива) позволит не просто получать разрозненные в пространстве результаты, но и интерпретировать, аппроксимировать их и получать новые, имеющие практическую

значимость закономерности распределения напряжений на месторождениях.

Выводы

На сегодняшний день появляется все больше возможностей для комплексного изучения сложных вопросов горного дела. С развитием технологий и техники можно проводить не только локальное изучение процессов, но и вести широкий спектр измерений, накапливать и анализировать собираемую информацию на основании комплексного подхода. Это особенно актуально для изучения НДС массива месторождения как одного из самых важных и непостоянных факторов.

В статье предложен подход к изучению и прогнозу напряженного состояния породного массива, основанный на комплексном анализе локальных и массовых измерений. Разработаны условия выбора методов измерений и критерии назначения подобных участков, что позволяет обеспечить требуемую надежность результатов анализа и прогнозирования напряженного состояния массива. Данный подход показал свою эффективность на месторождении Олений ручей.

Следующими шагами развития такого комплексного подхода должны стать, в первую очередь, распространение и адаптация его к условиям других месторождений, в том числе значительно отличающихся с точки зрения механического поведения вмещающего массива под нагрузкой, а также совершенствование методов математического анализа получаемой информации и более глубокая адаптация теории подобия для формирования знаний о напряженном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марысюк В. П. Методика оценки напряженного состояния краевой части рудного массива при отработке глубоких рудников Талнаха: Автореф. дис. канд. техн. наук / Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет). СПб, 2009. 20 с.
2. Мельников, Д. Н. Измерение напряжений в массиве пород Ждановского месторождения методом разгрузки (торцевой вариант) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 1 (11). С. 57–61.
3. Семенова И. Э., Земцовский А. В., Павлов Д. А. Комплексное геомеханическое исследование массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» при ведении подземных горных работ // Горн. информ.-аналит. бюл. 2014. № 4. С. 46–55.
4. Батугин А. С. К оценке напряженного состояния массива на месторождениях методами тектонофизики // Проблемы недропользования. 2019. № 4. С. 50–56.
5. Макаров А. Б. Оценка природного поля напряжений в массиве по сдвигению земной поверхности // Маркшейдерский вестник. 2009. № 5. С. 44–49.
6. Храмцов Б. А., Былин И. П., Корнеев П. В. Методика определения напряжений в массиве горных пород с использованием высокоточных геодезических измерений // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 8. С. 125–129.
7. Бабелло В. А., Бейдин А. В., Овсейчук В. А., Смолич С. В. Оценка состояния горного массива на основе анализа горно-геологической обстановки и моделирования его напряженности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 12. С. 41–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54.
8. Самсонов А. А. Оценка состояния массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» по результатам измерений напряжений // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 1 (11). С. 62–67.
9. Огородников Ю. Н. Применения теории подобия в геомеханике // Записки горного института. 2004. Т. 156. С. 31–34.
10. Огородников Ю. Н. Условия подобия натуральных моделей в проектировании крепи по аналогам // Межвуз. сб. «Механика подземных сооружений». Тульский политех. ин-т. Тула, 1990. С. 130–137.
11. Шабаров А. Н., Цирель С. В., Морозов К. В., Рассказов И. Ю. Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах // Горный журнал. 2017. № 9. С. 59–64.
12. Серпуховитина Т. Ю., Лазарев Р. А., Цыкорин И. А. Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород как фундамент локального прогноза удароопасности (на примере Коробковского месторождения железистых кварцитов) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5 (специальный выпуск 14). С. 11–20. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-14-11-20.
13. Синкевич Н. И. Исследования напряженного состояния массивов горных пород и проявлений горного давления в геодинамически опасном регионе // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 5. С. 35–40.
14. Широков В. Н. Систематизация методов изучения напряженного состояния массивов горных пород по информационному критерию // Сергеевские чтения. «Развитие научных идей академика Е. М. Сергеева на современном этапе». Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 639–645.
15. Balek A., Sashourin A. In-situ rock mass stress-state measurements in scales of mineral deposits: problem-solving // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 56. № 02004. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602004.
16. Леонтьев А. В. Обзор данных инструментального контроля напряжений в

массиве Таштагольского месторождения // Проблемы недропользования. 2018. № 3. С. 44–53.

17. Korchak P. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in over-stressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit» // E3S Web of Conferences 56 02023, VII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”. 2018.

18. Корчак П. А., Карасев М. А. Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 1. С. 67–80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.

19. Корчак П. А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №5. С. 85–98.

20. Ломов М. А., Константинов А. В. Терешкин А. А. Перспективные методы оценки и контроля геомеханического состояния массивов пород // Проблемы недропользования. 2019. № 4. С. 83–90.

21. Martin C. D., Read R. S., Martino J. B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel // International Journal Rock Mechanics And Mining Science, 1997. № 34(7). Pp. 1065–1073.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Синегубов Вячеслав Юрьевич, заместитель генерального директора по научной работе, ООО «Геотехническое бюро», (199155, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Уральская, д. 17, к. 3), к.т.н., e-mail: vs@gtburo.ru

Заявленный вклад авторов:

Синегубов Вячеслав Юрьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста, сбор и анализ данных, написание текста, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE APPROACH TO PREDICTING THE STRESS STATE OF THE ROCK MASS AND TESTING IT AT THE OLENIY RUCHEY DEPOSIT

Vyacheslav Yu. Sinigubov

Geotechnical Bureau Ltd

* for correspondence: gb@gtburo.ru



Article info

Received:

30 September 2024

Accepted for publication:

22 April 2025

Accepted:

30 April 2025

Abstract.

The efficiency and safety of construction and operation of any mining enterprise, and especially to rock burst hazardous or deposits, directly depends on the degree of detail and reliability of the stress state forecast at each mining site. The article contains the research results aimed at developing a reliable and practical approach to studying and predicting the stress state of the rock mass during the construction of underground mines. The analysis of the latest achievements in the field of studying the stress-strain state of a rock mass is presented, and main problems that researchers face in the field stress assessment are identified. The developed approach is based on the principles of mass, accuracy and similarity of measurements proposed by Yu.N. Ogorodnikov. Based on these principles, a comprehensive approach is described enabling deep analysis and generalization of

Published:
11 June 2025

Keywords: ore deposit,
stress-strain state, stress
measurement, full-scale
measurements,
brittle fracture.

geomechanical processes occurring in rock burst hazardous ore deposits. The sequence of measurement and information processing stages is presented, as well as the results of testing the approach on the example of the apatite-nepheline deposit Oleniy Ruchey, located in the Khibiny massif on the Kola Peninsula. The approach application allows to give a qualitative and quantitative assessment of the initial stress field throughout the deposit, to find patterns of changes in the stress field with increasing depth, and to predict geomechanical processes on projected horizons. The obtained data coincide with the results of instrumental stress measurements at the mine, which allows us to conclude that this approach is effective.

For citation: Sinegubov V.Yu. Development of a comprehensive approach to predicting the stress state of the rock mass and testing it at the Oleniy Ruchey deposit. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=*Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025; 2(168):68-79. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-68-79, EDN: HGCOCG

REFERENCES

1. Marysyuk V.P. Methodology for assessing the stress state of the marginal part of the ore massif during the mining of deep mines of Talnakh: Abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State Mining Institute named after G.V. Plekhanov (Technical University); 2009.
2. Melnikov D.N. Stress measurement in the rock mass of the Zhdanovskoye deposit by unloading method (end version). *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 1(11):57–61.
3. Semenova I.E., Zemtsovsky A.V., Pavlov D. A. Complex geomechanical study of the rock mass of the impact-prone Oleniy Ruchey deposit during underground mining operations. *Gorn. inform.- analit. byul.* 2014; 4:46–55.
4. Batugin A.S. On the issue of intense state policy in the field and methods of its implementation. *Problems of science*. 2019; 4:50–56.
5. Makarov A.B. Assessment of the nature of the stress field in the mountains on the earth surface displacement marks. 2009; 5:44–49.
6. Khramtsov B.A., Bylin I.P., Korneev P.V. Methodology for determining stresses in an array of rocks using high-precision geodetic measurements. *Bulletin of the V.G. Shukhov BSTU*. 2017; 8:125–129.
7. Babello V.A., Beidin A.V., Ovseychuk V.A., Smolich S.V. Assessment of the state a mountain range based on the analysis of the mining and geological situation and modeling of its intensity. *Mining information and analytical bulletin*. 2019; 12:41–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54.
8. Samsonov A.A. Assessment of the state of the rock mass of the impact-prone deposit "Oleniy Ruchey" based on the results of stress measurements. *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 1(11):62–67.
9. Ogorodnikov Yu.N. Applications of the theory of similarity in geomechanics. *Notes of the Mining Institute*. 2004; 156:31–34.
10. Ogorodnikov Yu.N. Conditions of similarity of full-scale models in the design of supports based on analogs. *Interuniversity collection "Mechanics of underground structures"*. Tula Polytechnic Institute. In-t. Tula, 1990. Pp. 130–137.
11. Shabarov A.N., Tsirel S.V., Morozov K.V., Rasskazov I.Yu. The concept of complex geodynamic monitoring in underground mining operations. *Mining Journal*. 2017; 9:59–64.
12. Serpukhovitina T.Yu., Lazarev R.A., Tsitsorin I.A. Assessment of stress-strain state of the rock mass as the foundation of the local forecast of impact hazard (on the example of the Korobkovsky deposit of ferruginous quartzites). *Mining information and analytical bulletin*. 2020; 5(special issue 14):11–20. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-14-11-20.
13. Sinkevich N.I. Studies of the stressed state of rock massifs and manifestations of mountain pressure in a geodynamically dangerous region. *Occupational safety in industry*. 2011; 5:35–40.
14. Shirokov V.N. Systematization of methods for studying the stressed state of rock massifs by information criterion. *Sergeyev readings. "The development of scientific ideas of academician E.M. Sergeyev at the present stage"*. 2014; 16:639–645.
15. Balek A., Sashurin A. Measurements of the stress state of a rock mass in situ on the scale of mineral deposits: solving problems. *Web conferences E3S*. 2018; 56:02004. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602004.
16. Leontiev A.V. Review of instrumental stress monitoring data in the Tashtagolskoye field array. *Problems of subsoil use* 2018; 3:44–53.
17. Korchak P. Investigation of the patterns of formation of brittle cracks around mine workings in overstressed rocks at the mines of the Kirov branch of JSC Apatit. *Web conferences E3S 56 02023, VII International Scientific Conference "Problems of integrated development of georesources"*. 2018.
18. Korchak P.A., Karasev M.A. Geomechanical substantiation of the formation of zones of brittle fracture of rocks in the vicinity of the interfaces of mining workings of the mines of JSC "Apatit". *Sustainable development of mountain territories*. 2023; 15(1):67–80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.
19. Korchak P.A. Geomechanical forecast of the development of brittle fracture zones in the vicinity of the interface of mine workings in an overstressed rock

mass. *Mining information and analytical bulletin*. 2021; 5:85-98.

20. Lomov M.A., Konstantinov A.V. Tereshkin A.A. Promising methods for assessing and controlling the geomechanical state of rock massifs. *Problems of subsurface use*. 2019; 4:83-90.

21. Martin K.D., Reed R.S., Martino J.B. Observations of brittle fracture around a circular test tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 1997; 34 (7):1065-1073.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Vyacheslav Yu, Sinegubov, Deputy General Director for Scientific Work, Geotechnical Bureau LLC, (199155, Russia, St. Petersburg, Uralskaya str., 17), Candidate of Technical Sciences, vs@gtburo.ru

Contribution of the authors:

Vyacheslav Yu, Sinegubov – formulation of a research task, scientific management, conceptualization of research, conclusions, writing text, data collection and analysis, writing text, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

