ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2-1):19-32
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА ПОРОД ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАТУРНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

И.Э. Семенова[1], М.С. Кулькова[1]

[1] Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, e mail: m.kulkova@ksc.ru

Аннотация: Представлены результаты определения параметров природного напряженного состояния массива пород Ждановского медно-никелевого месторождения (АО «Кольская ГМК»). В настоящее время глубина отработки запасов месторождения в условиях подземной добычи достигла порядка 700 м, что, безусловно, осложняет геомеханическую обстановку, повышая вероятность разрушений массива горных пород и горных выработок в динамической форме. Одним из определяющих факторов обеспечения безопасности ведения горных работ является достоверное знание параметров природного напряжённо-деформированного состояния массива и закономерностей изменения напряжений с глубиной. На основе анализа результатов комплексного исследования, включающего натурные измерения и численное моделирование с учетом реконструкции горнотехнической ситуации на различных этапах ведения горных работ, выполнено восстановление параметров исходного поля напряжений. Установлено, что напряженное состояние массива пород Ждановского месторождения характеризуется гравитационно-тектоническим типом с выраженной субгоризонтальной ориентацией максимальной сжимающей компоненты напряжений, действующей по простиранию основных рудных тел. Выявлены соотношения компонент главных напряжений и определены закономерности изменения их величин с глубиной. Результаты исследования позволяют повысить достоверность геомеханических прогнозов при подземной отработке запасов рудных тел, выбрать оптимальный порядок и параметры ведения горных работ, а также предусмотреть комплекс мероприятий по обеспечению геодинамической безопасности.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, натурные методы исследования напряженно-деформированного состояния, численные методы, метод конечных элементов, геомеханическая модель, природное напряженное состояние, техногенно измененное напряженное состояние, подземные горные работы, Ждановское месторождение.

Для цитирования: *Семенова И. Э., Кулькова М. С.* Определение параметров природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с применением натурных и численных методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 19–32. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_19.

Determination of initial rock mass stress-strain state parameters of the Zhdanovskoe deposit using in-situ and numerical methods

I.E. Semenova[1], M.S. Kulkova[1]

[1] Mining Institute of Kola Science Center, Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, e mail: m.kulkova@ksc.ru

© И.Э. Семенова, М.С. Кулькова. 2026.

Abstract: The article presents the results of determining the parameters of the initial stress state of the rock mass of the Zhdanovskoe copper-nickel ore deposit (Kola MMC JSC). Currently, the depth of mining of the deposit's reserves using underground mining conditions has reached about 700 m, which undoubtedly complicates the geomechanical situation, increasing the probability of dynamic failure in the rock mass and workings occurred by rock pressure. One of the determining factors in ensuring the safety of mining operations is reliable knowledge of the parameters of its initial stress-strain state and the stress changes with depth. Based on the analysis of study results, including field measurements and stress state numerical modelling, taking into account the reconstruction of the mining situation at different stages of mining, the parameters of the initial stress field were obtained. It has been established that the stress state of the Zhdanovskoe deposit rock mass is characterised by a gravitational-tectonic type with a pronounced subhorizontal orientation of the maximum compressive stresses acting along the strike of the main ore bodies. The ratios of the principal stresses have been identified and the functions of their variation with depth were determined. The results of the study make it possible to improve the reliability of geomechanical forecasts during underground mining of ore bodies, select the optimal sequence and parameters of mining operations, and provide for a set of measures to ensure geodynamic safety.

Key words: stress-strain state, field methods for studying stress-strain state, numerical study methods, finite element method, geomechanical model, initial stress-strain state, disturbed stress-strain state, underground mining, Zhdanovskoe deposit.

For citation: Semenova I. E., Kulkova M. S. Determination of initial rock mass stress-strain state parameters of the Zhdanovskoe deposit using in-situ and numerical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):19-32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_19.

Введение

Ждановское месторождение, расположенное в пределах Печенгского рудного поля, характеризуется развитой тектоникой [1], изменчивыми физико-механическими свойствами литологических разностей, склонностью пород к хрупкому разрушению [2, 3] и значительным влиянием техногенных факторов [4]. Существенная глубина отработки запасов месторождения (около 700 м) осложняет условия ведения горных работ с точки зрения геомеханической ситуации. По мере увеличения глубины возрастает вероятность разрушений массива горных пород и горных выработок в динамической форме, что может представлять непосредственную угрозу безопасности персонала, приводить к простоям, аварийным ситуациям, утрате участков месторождений. В связи с этим обеспечение геомеханической и геодинамической безопасности подземных горных работ является одной из ключевых задач современной горной науки и практики.

Определяющим фактором обеспечения безопасности является достоверное знание характеристик массива горных пород, параметров его природного напряженно-деформированного состояния (НДС) и закономерностей изменения напряжений с глубиной. В выполненных ранее исследованиях [5—6] установлено, что все основные породы и руды месторождения являются хрупкими, и склонны к разрушению в динамической форме. Таким образом, это говорит об их потенциальной удароопасности, которая может быть реализована

при действии в массиве напряжений, величины которых близки к пределу прочности пород при сжатии. До недавнего времени сведения о напряженном состоянии Ждановского месторождения носили противоречивый и фрагментарный характер, а количественные закономерности изменения компонент тензора напряжений с глубиной не были установлены, что существенно ограничивало возможности прогноза опасных зон и обоснования безопасных параметров ведения горных работ.

В современных подходах к управлению и планированию горных работ в сложных геомеханических условиях требуется понимание различий между природным (исходным) и техногенно измененным напряженно-деформированным состояния массива горных пород [7—13]. Недостаточное внимание к данному различию может приводить к существенным ошибкам при интерпретации результатов натурных измерений и формировании граничных условий численных геомеханических моделей.

Использование в качестве исходных параметров напряжений, искаженных техногенным влиянием, снижает достоверность прогнозов напряженно-деформированного состояния и может привести к некорректной оценке устойчивости горных выработок и элементов системы разработки.

В условиях Ждановского месторождения, при ограниченной возможности размещения измерительных станций в пределах нетронутого массива натурные измерения НДС были выполнены в зоне техногенно измененного поля напряжений. Это обусловлено наличием уже сформированных в процессе длительной отработки месторождения открытыми и подземными очистными пространствами значительных размеров в пределах нескольких рудных тел, и потребовало решения задачи, связанной с восстановлением параметров исходного поля напряжений.

Для реконструкции природного напряженного состояния массива был применен комплексный подход, сочетающий натурные наблюдения, инструментальные измерения и численное моделирование. Исследования, выполненные в условиях массива, включали систематическое визуальное обследование горных выработок и измерения параметров НДС методом полной разгрузки. Численное моделирование НДС реализовано с использованием программного комплекса Sigma GT на основе метода конечных элементов [14, 15].

Результаты натурных исследований

Для качественной оценки параметров напряженно-деформированного состояния массива пород Ждановского месторождения в условиях подземного рудника «Северный» был выполнен комплекс натурных исследований, включающий визуальное систематическое обследование состояния подземных горных выработок и инструментальную съемку отдельных выработок. В рамках визуального обследования анализировались характер, локализация и пространственная ориентировка разрушений приконтурной части массива в различных горнотехнических условиях. Установлено, что максимальные разрушения, в том числе в динамической форме, преимущественно фиксировались в кровле выработок и в зонах сопряжения кровли со стенками (рис. 1), что указывает на действие значительных сжимающих напряжений субгоризонтальной ориентации.

Таким образом, на основе анализа результатов визуальных наблюдений были сформулированы следующие предположения:

- направление действия максимальных сжимающих напряжений (σ_{max}) близ-

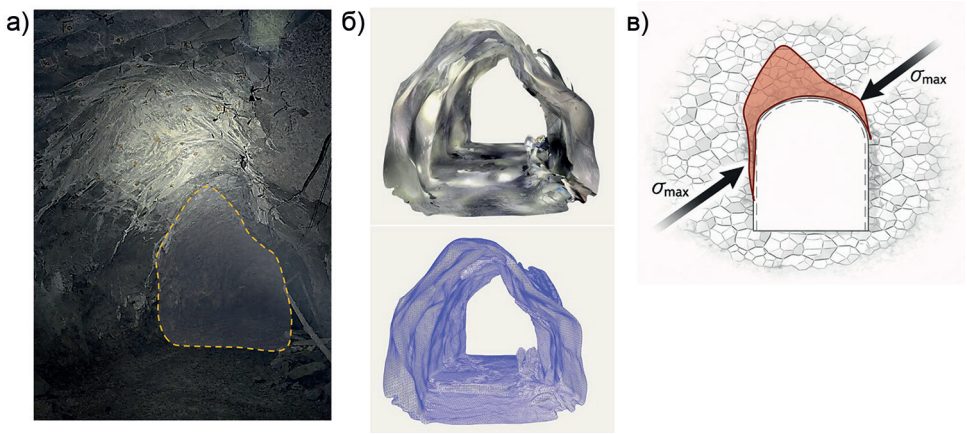

Рис. 1. Характерная форма разрушения контура подземных горных выработок Ждановского месторождения, отражающая действие субгоризонтальных сжимающих напряжений: фотография выработки (а); лидарная съемка выработки (б); схема, отражающая направление действия максимальных сжимающих напряжений (в)

Fig. 1. Typical shape of contour failure in underground mine workings of the Zhdanovskoe deposit, reflecting the action of subhorizontal compressive stresses: photograph of the excavation (a); LiDAR survey of the excavation (b); schematic representation of the direction of maximum compressive stresses (v)

ко к горизонтальному или отклоняется от горизонтали не более чем на ±30°, что позволяет отнести тип поля напряжений, действующих в массиве пород месторождения, к гравитационно-тектоническому с выраженной субгоризонтальной составляющей;

• величины действующих сжимающих напряжений являются достаточными для формирования зон разрушения приконтурной части массива, включая разрушения, реализующиеся в динамической форме.

Для уточнения и количественной проверки сделанных на основе визуальных обследований предположений была проанализирована инструментальная съемка вертикальной горной выработки. Анализ особенностей разрушения ее стенок позволил выделить зону максимальных деформаций и определить наиболее вероятное направление дейст-

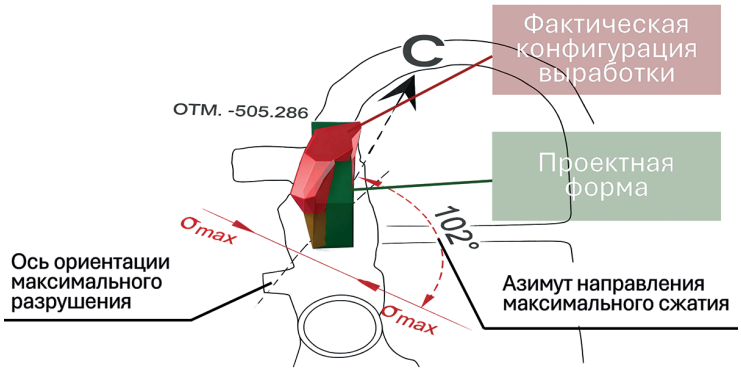

Рис. 2. Особенности разрушения стенок вертикальной выработки и предположительное направление действия максимального сжатия

Fig. 2. Features of wall failure in a vertical excavation and the preliminarily estimated direction of maximum compression

вия максимальных сжимающих напряжений. Установлено, что азимут направления максимального сжатия σ_{max} составляет порядка 100° от направления на север (рис. 2), что хорошо согласуется с результатами визуального обследования и подтверждает вывод о преобладании субгоризонтальных тектонических напряжений.

Таким образом, совокупность данных визуального обследования и инструментальной съемки разрушений подземных горных выработок указывает на доминирующую роль тектонических (субгоризонтальных) напряжений в формировании напряженно-деформированного состояния массива пород Ждановского месторождения и служит обоснованием для последующего анализа параметров поля напряжений с использованием инструментальных методов.

Визуальные и инструментальные наблюдения обеспечивают качественную оценку параметров напряженного состояния, однако не позволяют определить абсолютные значения его компонент. В связи с этим для количественного определения параметров НДС массива пород были выполнены измерения методом полной разгрузки [16 — 18]. Значения деформаций, полученные в процессе упругого восстановления выбуренного керна, пересчитаны в значения напряжений с использованием аппарата теории упругости. Основой для вычисления значений напряжений являлись результаты определения упругих свойств образцов пород в лабораторных условиях.

Результаты измерений, выполненных на восьми станциях в пределах рудного поля, подтвердили гипотезу, выдвинутую на основе анализа характера разрушения подземных горных выработок. Установлено, что максимальная (σ_{max}) и минимальная (σ_{min}) компоненты главных напряжений имеют преимущественно субгоризонтальную ориентировку, тогда как промежуточная компонента ($\sigma_{пр}$) ориентирована близко к вертикали. На рис. 3 представлен график, отражающий изменение значений главных компонент напряжений с глубиной по данным натурных измерений. Красными точками показаны измеренные значения σ_{max}, зелеными — $\sigma_{пр}$, синими — σ_{min}.

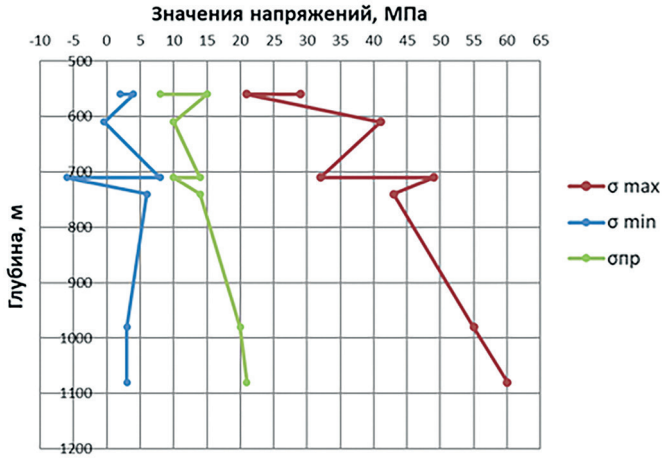

Рис. 3. Результаты измерений главных компонент напряжений (σ_{max}, $\sigma_{пр}$ и σ_{min}), полученные методом полной разгрузки в массиве пород Ждановского месторождения

Fig. 3. Results of in-situ measurements of the principal stress components (σ_{max}, σ_{med}, σ_{min}) obtained by the door-stopper method in the rock mass of the Zhdanovskoe deposit

Таблица 1

Значения главных компонент напряжений, полученные методом полной разгрузки в массиве пород Ждановского месторождения
Values of the principal stress components obtained by the doorstopper method in the rock mass of the Zhdanovskoe deposit

Отметка горизонта	Глубина, м	σ_{max}, МПа	$\sigma_{пр}$, МПа	$\gamma_н$, МПа	σ_{min}, МПа	$\sigma_{min}/\sigma_{max}$	$\lambda_1 = \sigma_{max}/\sigma_{пр}$	$\lambda_2 = \sigma_{min}/\sigma_{пр}$
260м_ЮЗРТ	560	29	8	16	2	0,07	3,6	0,25
260м_ЮВРТ	560	21	15	16	4	0,19	1,4	0,27
310м	610	41	10	18	–0,4	–0,01	4,1	0,04
410м	710	32	14	21	8	0,25	2,3	0,57
410м	710	49	10	21	–6	–0,12	4,9	0,60
440м	740	43	14	22	6	0,14	3,1	0,43
680м	980	55	20	29	3	0,05	2,8	0,15
780м	1080	60	21	32	3	0,05	2,9	0,14
Средние величины						$\overline{\lambda_0}$ = 0,12	$\overline{\lambda_1}$ = 3,1	$\overline{\lambda_2}$ = 0,3

Примечание: ЮЗРТ и ЮВРТ — юго-западное и юго-восточное рудные тела соответственно.

В табл. 1 представлены результаты натурных измерений значений главных компонент напряжений и их соотношения. $\gamma_н$ — расчетная величина вертикальных напряжений от собственного веса пород на глубине замеров; λ_0, λ_1 и λ_2 — безразмерные коэффициенты, определяющие соотношения компонент тензора напряжений.

Анализ результатов инструментальных измерений показал, что величины максимальной сжимающей компоненты напряжений закономерно возрастают с глубиной и достигают значений порядка 70 МПа на глубине 1080 м от земной поверхности, что в несколько раз превышает расчетную гравитационную составляющую. Это свидетельствует о су-

Рис. 4. Ориентация максимальной сжимающей компоненты напряжений относительно простирания рудных тел
Fig. 4. Orientation of the maximum compressive stress component relative to the strike of ore bodies

щественном вкладе тектонических напряжений в формирование НДС массива пород Ждановского месторождения. При этом полученные соотношения главных компонент напряжений $\sigma_{max} : \sigma_{пр} : \sigma_{min} = 1 : 0{,}3 : 0{,}1$ отражают выраженную анизотропию напряженного состояния массива.

Ориентировка вектора максимальных сжимающих напряжений характеризуется относительной устойчивостью по глубине: значения азимута преимущественно варьируют в интервале 120—150°, что соответствует направлению простирания основных рудных тел месторождения (рис. 4). Данное соответствие указывает на связь между структурно-тектоническим строением рудного поля и направлением действия максимальных напряжений.

Таким образом, результаты инструментальных измерений методом полной разгрузки не только подтверждают выводы, полученные на основе визуального и инструментального анализа разрушений горных выработок, но и обеспечивают количественное обоснование параметров поля напряжений. Полученные данные послужили основой для последующей реконструкции природного поля напряжений и формирования корректных граничных условий при выполнении численного геомеханического моделирования.

Результаты исследований с использованием численного моделирования

Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния массива пород и прогноза трансформации поля напряжений в процессе ведения горных работ была разработана численная геомеханическая модель месторождения. В настоящее время численное моделирование НДС широко применяется для прогноза геомеханической ситуации и выявления опасных участков массива с точки зрения их потенциального разрушения под влиянием фактора действующих напряжений [19, 21].

Геомеханическая модель Ждановского месторождения включает рудные тела и вмещающий массив, их основные физико-механические свойства, учитывает рельеф поверхности (рис. 5). В качестве граничных условий первоначально были приняты значения напряжений, полученные в массиве методом разгрузки. Моделирование НДС выполнено в упругой постановке.

Сравнение величин напряжений, полученных при измерениях параметров НДС методом полной разгрузки и результатов, полученных при численном моделировании на начальном этапе, показало, что значения напряжений, зафиксированные в областях измерите-

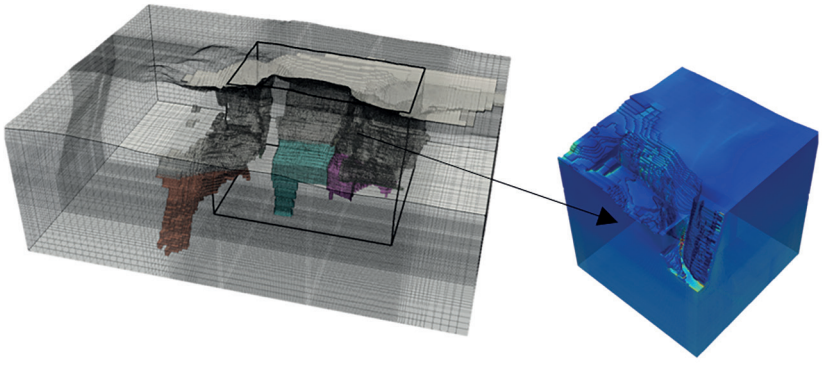

Рис. 5. Общий вид численной геомеханической модели НДС Ждановского месторождения
Fig. 5. View of the numerical geomechanical stress-strain state model of the Zhdanovskoe deposit

ных станций, в значительной степени отражают техногенно трансформированное состояние массива, сформированное под влиянием горных работ, и не позволяют непосредственно охарактеризовать природное напряженное состояние массива пород. В этих условиях возникла необходимость определения параметров природного напряженно-деформированного состояния, что было реализовано с использованием численного геомеханического моделирования.

При генерации геомеханической модели учитывались конфигурация рудных тел и земной поверхности, физико-механические свойства пород, слагающих месторождение. В расчетных вариантах реконструировалась горнотехническая ситуация на момент проведения измерений НДС. Определение параметров природного поля напряжений осуществлялось путем последовательного итерационного изменения граничных условий в виде узловых сил, задаваемых на гранях модели. После каждого расчетного шага значения главных компонент напряжений сравнивались с результатами измерений, полученных методом полной разгрузки в натурных условиях для каждой измерительной станции. Итерационная процедура продолжалась до достижения удовлетворительного совпадения расчетных и измеренных параметров в области всех восьми измерительных станций, что позволило определить параметры НДС массива пород Ждановского месторождения, соответствующие природному напряженному состоянию.

На рис. 6 приведен пример сопоставления результатов численного моделирования исходного поля напряжений и поля в районе измерительной станции № 2, трансформированного на определенном этапе ведения горных работ, а также их сравнение с результатами натурных измерений главных компонент напряжений, обозначенных красным пунктиром (σ_{max}) и синим пунктиром (σ_{min}) цветом. Анализ представленных данных показывает, что значения максимальной сжимающей компоненты в области измерений изменяются незначительно, тогда как минимальная компонента существенно снижается вследствие формирования зоны разгрузки, связанной с очистными работами.

В результате выполнения серии расчетов, учитывающих различные комбинации значений главных компонент напряжений и их соотношений, определен вариант, при котором заданные на границах нагрузки удовлетворительно отражают характер распределения природного поля напряжений Ждановского месторождения и особенности его трансформации, обусловленные влиянием очистных работ (см. рис. 7).

Анализ графиков (рис. 6), показывает удовлетворительную сходимость данных натурных измерений и численного моделирования как по абсолютным величинам напряжений, так и по характеру их изменения с глубиной. Наблюдаемые локальные расхождения могут быть обусловлены как геологическими особенностями массива, так и влиянием факторов, связанных с методикой и условиями проведения измерений. Достигнутое соответствие свидетельствует о корректности выбранного варианта граничного нагружения и адекватности принятой расчетной схемы. Определенные значения главных напряжений могут рассматриваться как параметры восстановленного природного напряженно-деформированного состояния массива пород и быть использованы в дальнейшем для прогноза геомеханической обстановки при развитии горных работ (см. табл. 2).

В результате выполненного исследования установлено, что соотношение главных компонент природного поля нап-

ряжений Ждановского месторождения составляет: $\sigma_{max(гор.)}$: $\sigma_{пр(верт.)}$: $\sigma_{min(гор.)}$ = = 1 : 0,5 : 0,4, что характеризует тип напряженного состояния массива как гравитационно-тектонический.

Для оценки изменения напряжений с глубиной с учетом гипотезы замедления роста тектонических компонент напряжений установлены аппроксимирующие функции изменения максимальной и минимальной главных компонент напряжений для условий массива пород Ждановского месторождения: σ_{max} = = 0,05z + 6,5 МПа, σ_{min} = 0,02z + 2,5 МПа, где z — глубина от поверхности, м (см. рис. 8). Полученные зависимости могут

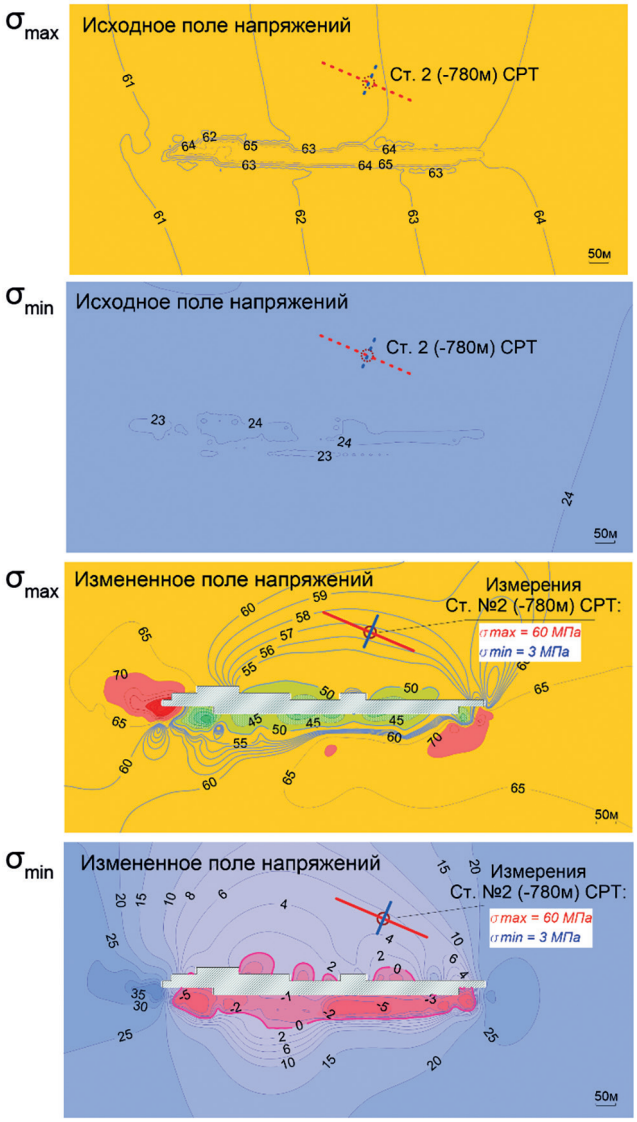

Рис. 6. Результаты моделирования исходного и измененного полей напряжений. Сравнение с данными натурных измерений. СРТ — Северное рудное тело

Fig. 6. Results of modeling of the initial and mining-induced stress fields. Comparison with in-situ measurement data. SRT — Northern ore body

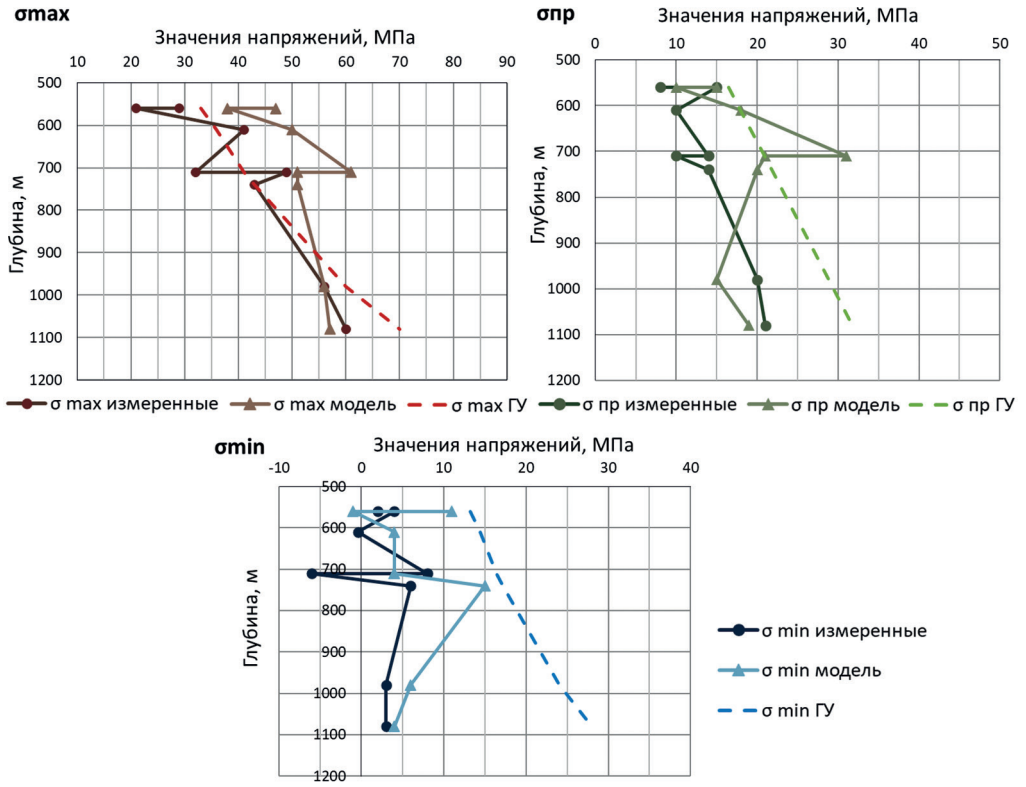

Рис. 7. Сопоставление значений главных компонент напряжений: измеренных в массиве (σ измеренные), заданных в модели в виде граничных условий (σ ГУ) и полученных в результате моделирования (σ модель)

Fig. 7. Comparison of the principal stress component values: measured in the rock mass (σ измеренные), specified in the model as boundary conditions (σ ГУ), and obtained from numerical modeling (σ модель)

Таблица 2

Значения главных компонент напряжений, полученных в результате реконструкции природного поля напряжений для массивов пород Ждановского месторождения
Values of the principal stress components obtained from the reconstruction of the initial stress field for the rock mass of the Zhdanovskoe deposit

Отметка гор.	**Глубина,м**	σ_{max}, МПа	$\sigma_{пр} = \gamma_{H}$, МПа	σ_{min}, МПа	σ_3/σ_1	λ_1	λ_2
260м	560	33	16	13	0,40	2,0	0,8
310м	610	36	18	14	0,40	2,0	0,8
410м	710	41	21	16	0,40	2,0	0,8
440м	740	43	22	17	0,40	2,0	0,8
680м	980	60	29	24	0,40	2,1	0,8
780м	1080	70	32	28	0,40	2,2	0,9
Средние величины					$\overline{\lambda_0}$ = 0,4	$\overline{\lambda_1}$ = 2,0	$\overline{\lambda_2}$ = 0,8

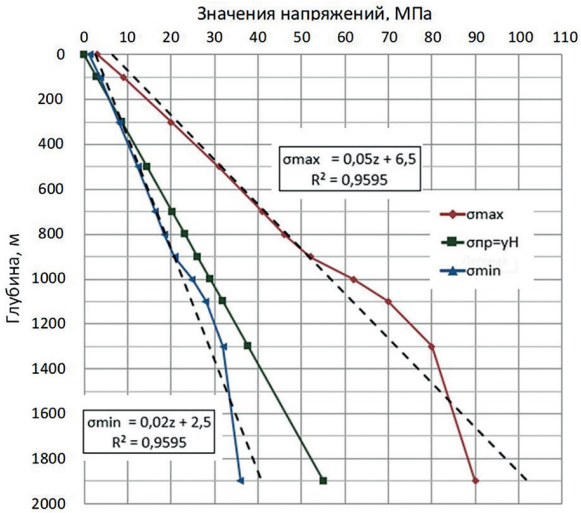

Рис. 8. Прогнозное распределение главных компонент тензора природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения

Fig. 8. Predicted distribution of the principal components of the initial stress tensor in the rock mass of the Zhdanovskoe deposit

быть использованы для прогноза напряженно-деформированного состояния массива пород при дальнейшем развитии горных работ.

Заключение

Выполненное исследование позволило определить параметры природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения на основе комплексного подхода, включающего натурные наблюдения, инструментальные измерения методом полной разгрузки и численное геомеханическое моделирование с реконструкцией горнотехнической ситуации на различных этапах ведения горных работ.

В ходе натурных исследований установлено, что характер разрушений подземных горных выработок, их пространственная ориентировка и локализация указывают на действие в массиве значительных субгоризонтально ориентированных сжимающих напряжений. Результаты инструментальных измерений методом полной разгрузки подтвердили данные выводы и показали, что максимальная и минимальная главные компоненты напряжений ориентированы преимущественно субгоризонтально, а промежуточная компонента — близка к вертикальной, что соответствует гравитационно-тектоническому типу напряженного состояния.

Показано, что измеренные значения напряжений в районах размещения измерительных станций в значительной степени отражают техногенно трансформированное состояние массива, обусловленное влиянием очистных работ, и не могут быть напрямую использованы для описания природного поля напряжений. В связи с этим выполнена реконструкция исходного напряженно-деформированного состояния массива пород методом численного моделирования.

По результатам реконструкции установлено, что соотношение главных компонент природного поля напряжений Ждановского месторождения составляет $\sigma_{max(гор.)} : \sigma_{пр(верт.)} : \sigma_{min(гор.)} = 1 : 0,5 : 0,4$, что характеризует напряженное состояние массива как гравитационно-тектоническое с выраженной субгоризон-

тальной ориентировкой максимальной сжимающей компоненты, направленной по простиранию основных рудных тел месторождения. На основе анализа восстановленных значений напряжений выявлены закономерности изменения главных компонент природного поля напряжений с глубиной.

Полученные результаты повышают достоверность геомеханических прогнозов, могут быть использованы при обосновании параметров и последовательности ведения подземных горных работ, а также при разработке мероприятий по обеспечению геомеханической и геодинамической безопасности при отработке запасов Ждановского месторождения.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам отдела Геомеханики ГоИ КНЦ РАН, проводившим измерения параметров действующих напряжений на Ждановском месторождении, а также специалистам АО «Кольская ГМК» за содействие в организации натурных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абаев А. И.*, *Касько А. О.*, *Коломиец О. Н.* Геологическое и минералогическое исследование Ждановского медно-никелевого месторождения // Горный журнал. — 2025. — № 12. — С. 4—10.

2. *Земцовский А. В.*, *Кузнецов Н. Н.*, *Пак А. К.* Исследование физических свойств и характера разрушения горных пород Ждановского месторождения (АО «Кольская ГМК») в условиях одноосного и трехосного сжатия // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 117—122.

3. *Козырев А. А.*, *Семенова И. Э.*, *Земцовский А. В.* Об оценке удароопасности массива горных пород Ждановского месторождения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2017. — № 14. — С. 300—303.

4. *Кудря А. О.*, *Неверов А. А.*, *Неверов С. А.*, *Шапошник Ю. Н.* Оценка вероятности выхода воронки обрушения на дневную поверхность при выемке вертикальных маломощных рудных залежей под дном карьера камерной системой разработки // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2024. — Т. 11. — № 2. — С. 44—51.

5. *Кузнецов Н. Н.* Исследование прочностных свойств и удельной энергии деформирования горных пород в условиях трехосного сжатия // Горная промышленность. — 2025. — № 2. — С. 140—145. — DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145.

6. *Нестеров К. В.*, *Кузенков М. В.* Развитие ресурсной базы АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. — 2019. — № 11. — С. 16—22.

7. *Сергеев С. В.*, *Синица И. В.* Геомеханическое сопровождение подземной отработки железных руд на комбинате «КМАруда» // Горный журнал. — 2019. — № 8. — С. 30—33.

8. *Зубков А. В.*, *Сентябов С. В.*, *Криницын Р. В.*, *Селин К. В.* Районирование территории по действующим первоначальным напряжениям на месторождениях полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 80—92. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_80.

9. *Авдеев А. Н.*, *Сосновская Е. Л.*, *Селин К. В.* Определение первоначальных напряжений массива горных пород при комбинированной отработке в подземных условиях // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2023. — № 4. — С. 352—364.

10. *Трофимов А. В.*, *Киркин А. П.*, *Кормнов А. А.*, *Шутов А. А.* Исследование напряженно-деформированного состояния массива Октябрьского и Талнахского месторождений методом полной разгрузки керна // Цветные металлы. — 2024. — № 10. — С. 31—39.

11. *Niederhuber T., Rische M., Müller B. I. R., Röckel T., Allgaier F., Fischer K. D., Schilling F. R., Friederich W.* How can mining data be used for regional stress derivation? Recommendations based on examples from the Ruhr area // Geomechanics for Energy and the Environment. — 2025. — March. — DOI: 10.1016/j.gete.2025.100648.

12. *Зубков А. В.*, *Феклистов Ю. Г.*, *Липин Я. И.* Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования // Проблемы недропользования. — 2016. — № 4. — С. 41—49.

13. *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.

14. *Семенова И. Э.*, *Аветисян И. М.* Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях // Горный журнал. — 2022. — № 1. — С. 28—33.

15. *Козырев А. А.*, *Панин В. И.*, *Семенова И. Э.* Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 12. — С. 347—359.

16. *Сентябов С. В.*, *Карамнов Д. В.* Методы определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями // Проблемы недропользования. — 2023. — № 1(36). — С. 54—63.

17. *Семенова И. Э.*, *Амосов П. В.*, *Кузнецов Н. Н.*, *Некрасов В. А.* Развитие подходов к расчету параметров напряженно-деформированного состояния массива пород по результатам измерений деформаций на торце скважины // Горная промышленность. — 2024. — № 5S. — С. 122—129.

18. *Рассказов М. И.*, *Курсакин Г. А.*, *Потапчук М. И.*, *Сидляр А. В.* Моделирование геомеханических процессов при отработке сложноструктурных удароопасных месторождений дальневосточного региона // Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. — Новосибирск, 2019. — С. 161—180.

19. *Еременко А. А.*, *Гаврилов А. Г.*, *Штирц В. А.*, *Писарев В. С.* Оценка геомеханического состояния подработанных пород массива при выемке слепого рудного тела на Таштагольском месторождении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 2. — С. 48—56.

20. *Дмитриев С. В.*, *Семенова И. Э.*, *Шестов А. А.* Развитие CAE системы численного моделирования НДС SIGMA GT // Горная промышленность. — 2023. — № 5S. — С. 135—141. — DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-135-141.

21. *Трофимов В. А.*, *Филиппов Ю. А.*, *Макеева Т. Г.* Компьютерное моделирование развития трещины под действием давления, приложенного к ее берегам // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 8. — С. 29—44. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_8_0_29. ГИАБ

REFERENCES

1. Abaev A. I., Kasko A. O., Kolomiets O. N. Geological and mineralogical study of the Zhdanovskoye copper–nickel deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 12, pp. 4—10. [In Russ].

2. Zemtsovsky A. V., Kuznetsov N. N., Pak A. K. Study of physical properties and failure behavior of rocks of the Zhdanovskoye deposit (JSC Kola MMC) under uniaxial and triaxial compression. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2019, vol. 6, no. 1, pp. 117—122. [In Russ].

3. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zemtsovsky A. V. On the assessment of rockburst hazard in the rock mass of the Zhdanovskoye deposit. *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS*. 2017, no. 14, pp. 300—303. [In Russ].

4. Kudrya A. O., Neverov A. A., Neverov S. A., Shaposhnik Yu. N. Estimating the probability of cave-in reaching the day surface when mining vertical low-thickness ore deposits under the pit floor using room-and-pillar method. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2024, vol. 11, no. 2, pp. 44—51. [In Russ].

5. Kuznetsov N. N. Study of strength properties and specific deformation energy of rocks under triaxial compression. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 2, pp. 140—145. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-140-145.

6. Nesterov K. V., Kuzenkov M. V. Development of the resource base of JSC Kola MMC. *Tsvetnye Metally*. 2019, no. 11, pp. 16—22. [In Russ].

7. Sergeev S. V., Sinitsa I. V. Geomechanical support of underground iron ore mining at the KMA Ruda plant. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 8, pp. 30—33. [In Russ].

8. Zubkov A. V., Sentyabov S. V., Krinitsyn R. V., Selin K. V. Territorial zoning of mineral deposits by initial stresses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 80—92. [In Russ]. DOI: 10.25018 /0236_1493_2021_52_0_80.

9. Avdeev A. N., Sosnovskaya E. L., Selin K. V. Determination of initial stresses in the rock mass during combined underground mining. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2023, no. 4, pp. 352—364. [In Russ].

10. Trofimov A. V., Kirkin A. P., Kormnov A. A., Shutov A. A. Study of the stress–strain state of the Oktyabrskoye and Talnakhskoye deposits by the overcoring method. *Tsvetnye Metally*. 2024, no. 10, pp. 31 – 39. [In Russ].

11. Niederhuber T., Rische M., Müller B. I. R., Röckel T., Allgaier F., Fischer K. D., Schilling F. R., Friederich W. How can mining data be used for regional stress derivation? Recommendations based on examples from the Ruhr area. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2025. March. DOI: 10.1016/j.gete.2025.100648.

12. Zubkov A. V., Feklistov Yu. G., Lipin Ya. I. Deformation methods for determining the stress state of rocks at subsoil use facilities. *Problems of Subsoil Use*. 2016, no. 4, pp. 41 – 49. [In Russ].

13. Melnikov D. N. Stress measurements in the rock mass of the Zhdanovskoye deposit by the stress relief method (end-face version). *Herald of the Kola Science Center of RAS*. 2019, no. 1 (11), pp. 57 – 61. [In Russ].

14. Semenova I. E., Avetisyan I. M. Geomechanical foundation for mining in rockburst-hazardous conditions: Concept development. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 1, pp. 28 – 33. [In Russ].

15. Kozyrev A. A., Panin V.I, Semenova I. E. Geodynamic risk management at Khibiny apatite mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 12, pp. 347 – 359. [In Russ].

16. Sentyabov S. V., Karamnov D. V. Methods for determining initial stresses in the rock mass by in-situ measurements. *Problems of Subsoil Use*. 2023, no. 1(36), pp. 54 – 63. [In Russ].

17. Semenova I. E., Amosov P. V., Kuznetsov N. N., Nekrasov V. A. Development of approaches to calculating stress–strain parameters of a rock mass based on deformation measurements at the borehole end. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5S, pp. 122 – 129. [In Russ].

18. Rasskazov M. I., Kursakin G. A., Potapchuk M. I., Sidlyar A. V. Modeling of geomechanical processes during mining of complex-structured rockburst-hazardous deposits of the Far Eastern region. *Geomekhanicheskie polya i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovykh zon katastroficheskikh sobytiy v gornotekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh* [Geomechanical Fields and Processes: Experimental and Analytical Studies of Formation and Development of Focal Zones of Catastrophic Events in Mining and Natural Systems], Novosibirsk, 2019, pp. 161 – 180. [In Russ].

19. Eremenko A. A., Shtirts V. A., Pisarev V. S. Geomechanical assessment of overlying rock mass in blind orebody mining at Sheregesh deposit. *Journal of Mining Sciences*. 2023, no. 2, pp. 48 – 56. [In Russ].

20. Dmitriev S. V., Semenova I. E., Shestov A. A. Development of the CAE system for numerical modeling of the stress–strain state SIGMA GT. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 5S, pp. 135 – 141. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-135-141.

21. Trofimov V. A., Filippov Yu. A., Makeeva T. G. Computer modeling of fracture growth under the action of pressure applied to its surfaces. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 8, pp. 29 – 44. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_8_0_29.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенова Инна Эриковна[1] – канд. техн. наук, руководитель отдела,
e mail: i.semenova@ksc.ru, ORCID ID: 0000-0003-4074-7240,
Кулькова Мария Сергеевна[1] – канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
e mail: m.kulkova@ksc.ru, ORCID ID: 0000-0003-4417-0223,
[1] Горный институт Кольского научного центра РАН.
Для контактов: *Кулькова М. С.*, e-mail: m.kulkova@ksc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.E. Semenova[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Department,
e mail: i.semenova@ksc.ru, ORCID ID: 0000-0003-4074-7240,
M.S. Kulkova[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e mail: m.kulkova@ksc.ru, ORCID ID: 0000-0003-4417-0223,
[1] Mining Institute of Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.
Corresponding author: M.S. Kulkova, e-mail: m.kulkova@ksc.ru.

Получена редакцией 18.12.2025; получена после рецензии 12.01.2026; принята к печати 19.01.2026.
Received by the editors 18.12.2025; received after the review 12.01.2026; accepted for printing 19.01.2026.