

# Опыт применения CAE Fidesys при разработке численных геомеханических моделей Ждановского месторождения

А.А. Козырев<sup>1</sup>, А.В. Земцовский<sup>1</sup>, М.С. Кулькова<sup>1</sup>, М.А. Соннов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

✉sonnov@cae-fidesys.com

**Резюме:** Ждановское месторождение сульфидных медно-никелевых руд расположено на северо-западе Мурманской области и является сырьевой базой АО «Кольская ГМК». Месторождение разрабатывается подземным способом с использованием системы разработки с подэтажным обрушением в качестве основной. На некоторых участках месторождения в связи с особенностями залегания рудных тел применяется система разработки с открытым очистным пространством. Применение системы разработки с открытым очистным пространством требует определения устойчивых параметров камер и целиков. Для обеспечения безопасных условий отработки запасов месторождения необходимо изучение изменения напряженно-деформированного состояния массива в процессе очистной выемки.

Одним из возможных решений задач подобного рода является моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с использованием метода конечных элементов. Примером программного обеспечения, основанного на этом методе, является CAE Fidesys. Использование CAE Fidesys для решения задач геомеханики позволяет создавать модели как отдельных выемочных единиц в случаях локальных задач определения устойчивости камер и целиков, так и значительные по масштабам модели, включающие несколько рудных тел и вмещающие их области массивов пород. В статье рассматриваются решения обоих типов задач геомеханики рудных массивов с использованием CAE Fidesys для условий Ждановского месторождения.

**Ключевые слова:** Ждановское месторождение, напряженно-деформированное состояние, геомеханическая модель, численное моделирование, устойчивость камер и целиков, система подэтажной разработки, безопасность горных работ

**Для цитирования:** Козырев А.А., Земцовский А.В., Кулькова М.С., Соннов М.А. Опыт применения CAE Fidesys при разработке численных геомеханических моделей Ждановского месторождения. *Горная промышленность*. 2021;(6):94–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-94-98.

## Experience of CAE Fidesys application in numerical geomechanical modelling of Zhdanovskoe deposit

A.A. Kozyrev<sup>1</sup>, A.V. Zemtsovskiy<sup>1</sup>, M.S. Kulkova<sup>1</sup>, M.A. Sonnov<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation

<sup>2</sup> Fidesys LLS, Moscow, Russian Federation

✉sonnov@cae-fidesys.com

**Abstract:** The Zhdanovskoe copper-nickel sulfide ores deposit is located in the north-west of the Murmansk region and is a mineral raw material source for JSC «Kola MMC». The main mining method used is sublevel caving. In some areas, due to the complex shape of the ore bodies, the open stoping mining method is used which requires determining stable parameters of stopes and pillars. It is necessary to study the stress-strain state of the deposit to ensure safe mining conditions. One of the possible solutions is the modeling of the stress-strain state of rock mass using the finite element method, for example, CAE Fidesys, which is FEM-based software. The use of CAE Fidesys for solving geomechanics tasks allows creating models of individual excavation units to determine the stability of stopes and pillars, and large-scale models that include several ore bodies and areas of the host rock mass. The article considers solutions of both types of geomechanics tasks using CAE Fidesys for conditions of the Zhdanovskoe deposit.

**Keywords:** Zhdanovskoe deposit, stress-strain state, geomechanical model, numerical modeling, stability of stopes and pillars, sublevel caving mining method, mining safety

**For citation:** Kozyrev A.A., Zemtsovskiy A.V., Kulkova M.S., Sonnov M.A. Experience of CAE Fidesys application in numerical geomechanical modelling of Zhdanovskoe deposit. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(6):94–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-94-98.

**Введение**

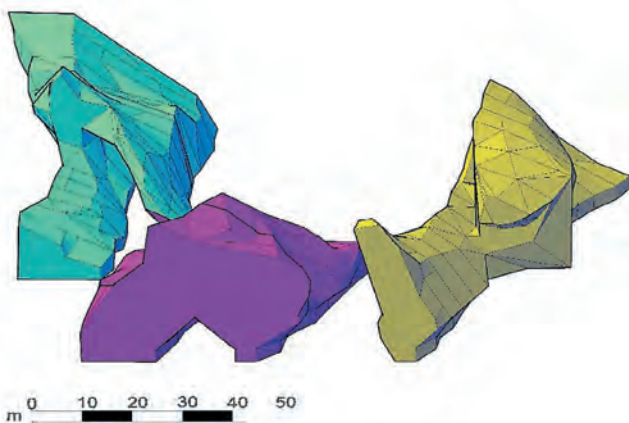
На Ждановском медно-никелевом месторождении в качестве основной применяется система разработки с поэтажным обрушением, однако на некоторых участках используется система с открытым очистным пространством [1]. Отработка запасов в пределах одного участка или близко расположенных участков рудных тел с использованием двух систем разработки одновременно осложняет горнотехническую ситуацию. Более того, применение систем с открытым очистным пространством само по себе обуславливает необходимость обоснования устойчивых параметров камер и целиков. Данные факторы, а также интенсивное понижение фронта очистных работ требуют изучения их напряженно-деформированного состояния (НДС). В настоящее время существует множество методов, позволяющих осуществлять оценку и прогноз НДС, однако наиболее распространенным и зарекомендовавшим себя является метод численного моделирования [2]. В программном продукте CAE Fidesys реализован метод конечных элементов, который позволяет решать задачи, связанные с устойчивостью, используя законы упругости, которым подчиняется массив горных пород [3]. В статье рассматриваются прикладные задачи, связанные с обоснованием устойчивости камер при отработке запасов линзы, а также моделированием состояния массива висячего бока при развитии горных работ в предохранительном целике.

**Обоснование устойчивости запасов линз Ждановского месторождения**

Запасы линз в районе Юго-Западного рудного тела (ЮЗРТ) Ждановского месторождения предполагалось отработать системой разработки с открытым очистным пространством. Применение такой системы подразумевает определение оптимальных параметров камер и целиков с точки зрения безопасности и эффективности горных работ.

Необходимо отметить, что из-за геологических особенностей в данной части месторождения очистные камеры и целики будут обладать сложной морфологией с сильно развитой тектоникой. Размер рудного тела по простиранию составляет 350–400 м, угол падения в основном 45–70°. На некоторых участках массива камеры сливаются в единое очистное пространство. Схематически конфигурация линз представлена на рис. 1.

Для оценки НДС массива пород применялся метод конечных элементов, который был реализован в программном

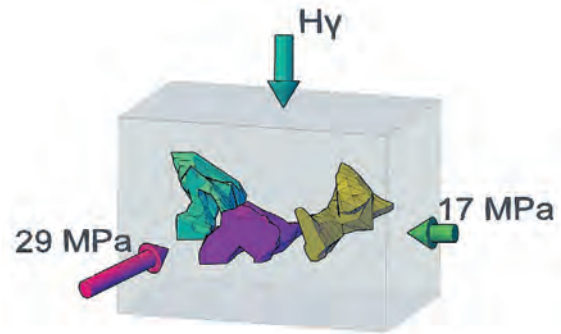


**Рис. 1**  
Конфигурация линз в районе Юго-Западного рудного тела

**Fig. 1**  
Configuration of lenses within the area of the South-West ore body

обеспечении CAE Fidesys, разработанном ООО «Фидесис». Программное обеспечение хорошо себя зарекомендовало и широко применяется при оценке НДС на рудниках Заполярного Филиала ПАО «ГМК «Норильский никель» [4].

Для оценки величин главных напряжений вокруг камер и в целиках при моделировании НДС была рассмотрена расчетная схема (рис. 2). На расчетной схеме представлены: область моделирования, камеры, целики и граничные условия в виде направлений действия и величин главных напряжений. Величины и направления действия главных компонент тензора напряжений были получены при измерениях напряжений методом разгрузки в данном районе [5].



**Рис. 2**  
Расчетная схема модели

**Fig. 2**  
Model calculation scheme

Так как породы имеют близкие значения физико-механических свойств, для моделирования были взяты усредненные значения: удельный вес  $\gamma = 2,8 \text{ т/м}^3$ ; модуль упругости  $E = 78,3 \text{ ГПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25$ .

В результате моделирования в районе камер были получены данные по НДС массива. На рис. 3 и 4 представлены распределения максимальных  $\sigma_{\max}$  и минимальных  $\sigma_{\min}$  напряжений по разрезу 19<sup>+5</sup> соответственно. Положительные значения соответствуют сжимающим напряжениям, а отрицательные – растягивающим.



**Рис. 3**  
Распределения максимальных  $\sigma_{\max}$  напряжений по разрезу 19<sup>+5</sup>

**Fig. 3**  
Distribution of maximum  $\sigma_{\max}$  stresses along section 19<sup>+5</sup>

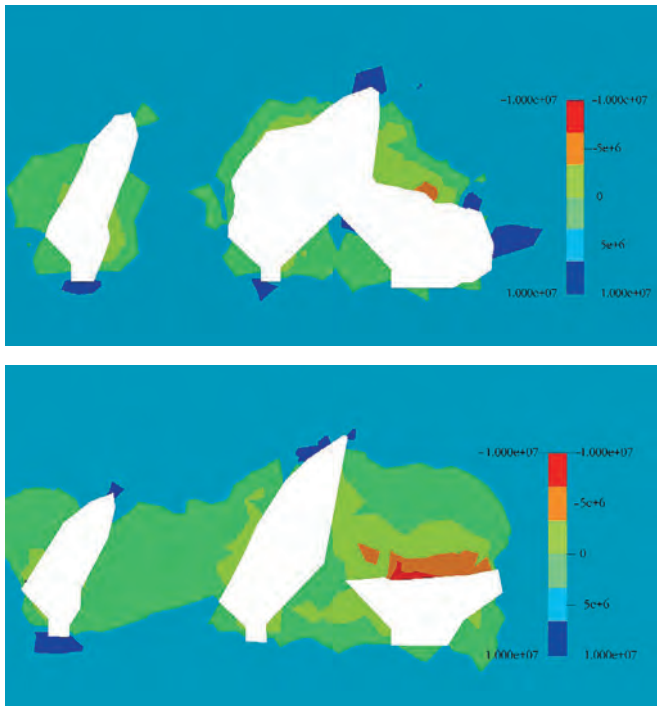


Рис. 4  
Распределения минимальных  $\sigma_{min}$  напряжений по разрезу 19+5

Fig. 4  
Distribution of minimal  $\sigma_{min}$  stresses along section 19+5

В результате проведенных исследований НДС массива пород установлено следующее:

- 1) кровля камер находится в устойчивом состоянии;
- 2) возможно разрушение целиков в их узких частях, где размеры достигают нескольких метров;
- 3) в некоторых целиках будут формироваться зоны растягивающих напряжений, что может отрицательно сказаться на устойчивости данных выработок.

**Уточнение безопасных параметров предохранительного целика под водохранилищем «Селика-Ярви»**

Значительное понижение горных работ на Ждановском месторождении вызывает необходимость рассмотрения возможности безопасного извлечения труднодоступных запасов. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы является отработка части Юго-восточного рудного тела (ЮВРТ), которая находится в охранном целике под водохранилищем «Селика-Ярви» и представлена на рис. 5 желтым цветом. Синим цветом представлены границы охранного целика, фиолетовым – ЮВРТ, желтым – часть запасов ЮВРТ, возможность выемки которых рассматривается в этой работе.

Расчет выполнялся с помощью метода конечных элементов для упругого изотропного массива горных пород в ПО Fidesys.

В результате была получена модель, включающая в себя ЮВРТ, Центральное рудное тело, положение карьера, рельеф дневной поверхности и текущее положение горных работ. Также были учтены различия свойств основных породных разностей [6], представленных в табл. 1.

При задании граничных условий были рассмотрены 2 варианта типа поля напряжений: гравитационный и гравитационно-тектонический (рис. 6).

Граничные условия при действии тектонических напряжений задавали по результатам измерений напряжений на Ждановском месторождении [5].

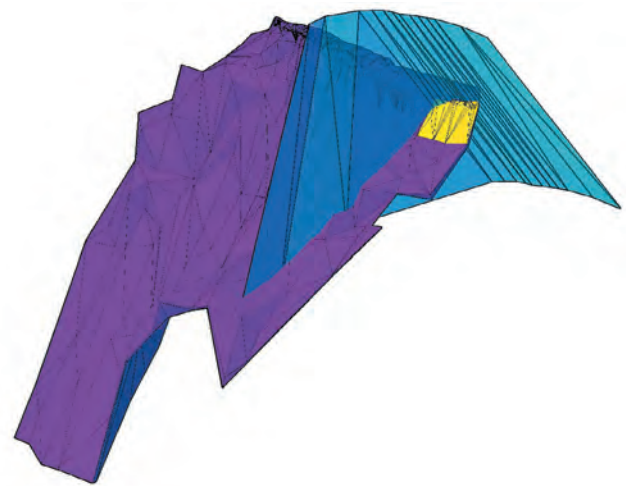


Рис. 5  
Юго-восточное рудное тело (фиолетовый цвет) и охранный целик (синий цвет)

Fig. 5  
The South-Eastern ore body (purple) and the safety pillar (blue)

Таблица 1  
Физико-механические свойства пород Ждановского месторождения

Table 1  
Physical and mechanical properties of rocks of the Zhdanovskoye deposit

Тип породы (разности)	Модуль Юнга E, ГПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Диабазы	85	0,27	2910
Туфогенно-осадочные породы	61	0,30	2830
Перидотиты	74	0,26	2980
Закладочный массив	4,5	0,37	1800

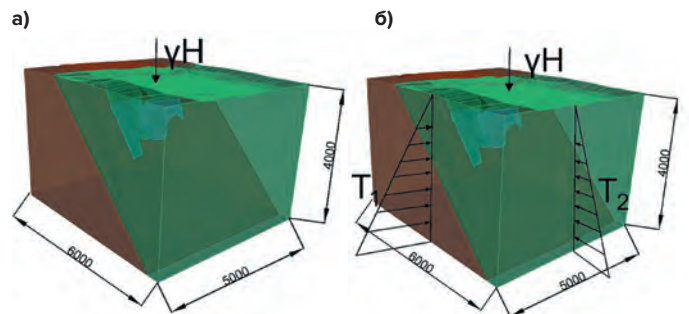


Рис. 6.  
Схема задания граничных условий:  
а – действие только гравитации;  
б – наличие в массиве тектонических напряжений

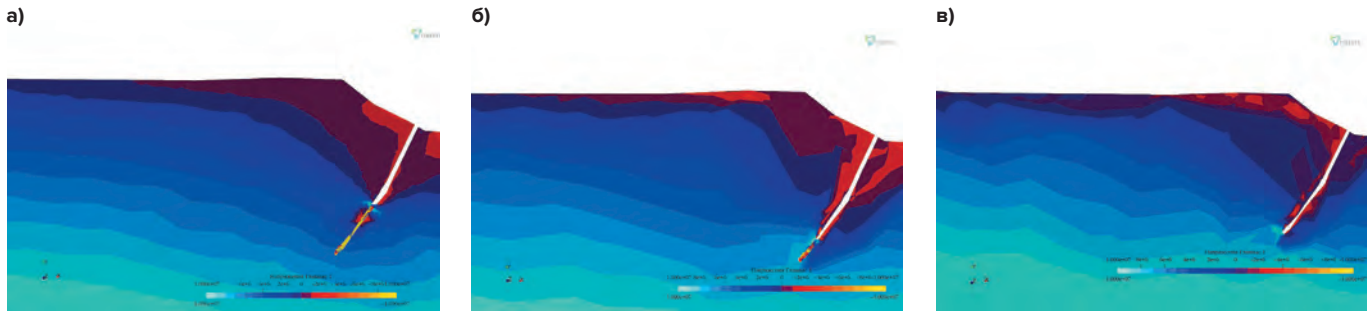
Fig. 6  
Scheme of setting boundary conditions:  
a – action of gravity only;  
b – presence of tectonic stresses in the rock mass

Для оценки изменения НДС массива налегающих пород при отработке запасов ЮВРТ были рассчитаны несколько вариантов развития горных работ на различную глубину:

- 1) текущее положение работ на отметке –254 м;
- 2) положение работ на отметке –350 м;
- 3) положение работ на отметке –440 м.

Были проанализированы максимальные растягивающие напряжения. Данные напряжения были выбраны для анализа, т.к. они характеризуют возможность разрушения массива горных пород и прорастания трещин в районе водохранилища.





**Рис. 7**  
Распределение максимальных напряжений при действии только гравитационной составляющей при положении горных работ: а –254 м, б –350 м, в –440 м

**Fig. 7**  
Distribution of maximum stresses under the action of gravitational component only at the position of the mining operations: а –254 m, б –350 m, в –440 m

За величину критических напряжений было принято значение  $\sigma_{кр} \approx 2$  МПа, и предполагалось, что на участке массива, где растягивающие напряжения превышали 2 МПа, возможно развитие существующих или образование новых трещин отрыва и, как следствие, разрушение массива.

В результате моделирования были получены данные о распределении действующих напряжений в массиве горных пород в районе водохранилища «Селика-Ярви» при действии в нетронутом массиве гравитационного и гравитационно-тектонического полей напряжений.

Необходимо отметить, что из-за особенностей программного обеспечения сжимающие напряжения имеют отрицательные значения, а растягивающие – положительные. Таким образом, для выявления зон растяжений будем анализировать максимальную компоненту главных напряжений.

На рис. 7 представлено распределение максимальной компоненты при последовательном увеличении глубины горных работ при действии только гравитационной составляющей.

На рис. 7, а, б, в отображена шкала соответствия цветов значениям напряжений. Зоны со значительными растягивающими напряжениями больше критических значений 2 МПа представлены красно-желтым спектром цветов.

Как видно из данных рис. 7, при начальном положении горных работ до отметки –256 м область со значительными растяжениями формируется только в висячем боку в консоли зависания. При достижении работ отметки –350 м растяжения развиваются в консоли и появляются на поверхности. При глубине работ –440 м значительные растягивающие напряжения сливаются в одну область, которая охватывает как поверхность, так и подработанный висячий бок. Данная ситуация может привести к прорастанию

значительных трещин отрыва до поверхности, что отрицательно скажется на состоянии массива горных пород в районе водохранилища.

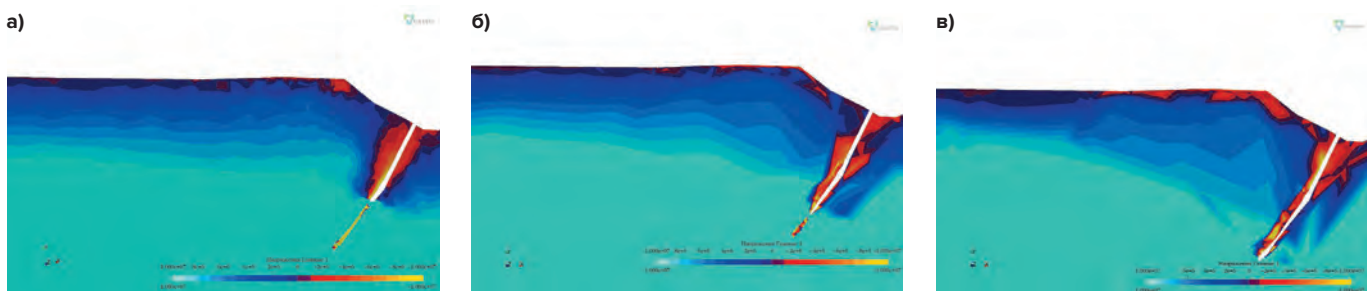
На рис. 8 представлено распределение максимальной компоненты главных напряжений при действии гравитационно-тектонического поля напряжений.

Как и в случае действия только гравитационной составляющей, так и при наличии тектонических напряжений, можно наблюдать увеличение области растягивающих напряжений при увеличении глубины горных работ. Худшее состояние массив горных пород имеет на отметке ведения горных работ –440 м, при которых область значительных растяжений охватывает как поверхность, так и подработанный висячий бок, что может привести к прорастанию трещин отрыва до поверхности.

В результате проведенных исследований было установлено, что наихудшее состояние массива горных пород будет при отработке запасов ЮВРТ до отметки –440 м при любом типе поля напряжений. При отработке до отметки –350 м массив сохраняет устойчивое состояние и прорастание трещин отрыва до поверхности в районе водохранилища маловероятно. При этом наличие в массиве тектонических напряжений будет препятствовать увеличению существующих и появлению новых трещин, что благоприятно сказывается на устойчивости массива горных пород. Возможно частичное обрушение консоли подработанных пород, которое существенно не изменит состояние охранного целика.

**Заключение**

С ростом потребности в добыче полезных ископаемых возникает необходимость ведения горных работ в сложных геомеханических и горнотехнических условиях. Для оценки и прогноза напряженно-деформированного состояния



**Рис. 8**  
Распределение максимальных напряжений при действии гравитационно-тектонического поля напряжений при положении горных работ: а –254 м, б –350 м, в –440 м

**Fig. 8**  
Distribution of maximum stresses under the action of the gravity-tectonic stress field at the position of the mining operations: а –254 m, б –350 m, в –440 m

массивов горных пород используется метод численного моделирования. В статье рассмотрен опыт создания геомеханических моделей при обработке рудных тел сложной морфологии и моделирования ситуации подработки предохранительного целика. Опыт использования CAE Fidesys,

разработанного ООО «Фидесис», показал эффективность его применения в решении задач геомеханики, в том числе при определении устойчивости элементов системы разработки в процессе добычи руд Ждановского месторождения.

**Список литературы**

1. Токарев О.В., Кузнецов М.В., Удалов А.Е. Технологии подземной выемки запасов медно-никелевых руд Ждановского месторождения в период перехода с открытого способа разработки на подземный. *Горный журнал*. 2015;(6):60–63. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.06.12>
2. Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на разных этапах освоения месторождений. В кн.: Мельников Н.Н. (ред.) *Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: труды Всерос. науч. конф. с междунар. участием, г. Апатиты, 23–26 сентября 2008 г.* СПб.: Реноме; 2009. С. 251–256.
3. Соннов М.А., Котиков Д.А., Куранов А.Л. Применение CAE Fidesys в решении геомеханических задач. *Горная промышленность*. 2018;(5):90–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92>
4. Соннов М.А., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Шпилев С.В. Применение численного и блочного геомеханического моделирования для определения параметров крепления камерных выработок большого сечения. *Горная промышленность*. 2021;(2):127–131. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-127-131>
5. Мельников Д.Н. Измерение напряжений в массиве пород Ждановского месторождения методом разгрузки (торцевой вариант). *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019;(1):57–61. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.57-61>
6. Zemtsovsky A.V., Kuznetsov N.N., Pak A.K. Physical properties and fracture behavior of rocks in uniaxial and triaxial compression: A case-study of Zhdanovskoe deposit, Kola Mining and Metallurgical Company. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;773:012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012058>

**References**

1. Tokarev O.V., Kuzenkov M.V., Udalov A.E. Underground mining technology for the transition from open-pit to underground operation at the Zhdanov copper–nickel ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(6):60–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.06.12>
2. Kozhyrev A.A., Semenova I.E., Shestov A.A. Numerical modeling of the stress-strain state of the rock mass as a basis for predicting the rock-bump hazard at different stages of field development. In: Melnikov N.N. (ed.) *Computer technologies in designing and planning of mining operations: Proceedings of the All-Russian Research Conference with international participation, Apatity, September 23–26, 2008*. St. Petersburg: Renome; 2009, pp. 251–256. (In Russ.)
3. Sonnov M.A., Kotikov D.A., Kuranov A.D. Application of CAE Fidesys in the solution of geomechanical tasks. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2018;(5):90–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-5-141-90-92>
4. Sonnov M.A., Trofimov A.V., Rummyantsev A.E., Shpilev S.V. Application of Numerical and Block Geomechanical Modelling to Determine Parameters of Large-Section Chambers. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2):127–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-127-131>
5. Melnikov D.N. Stress measurements in rock mass of the zhdanovskoe deposit by the doorstopper method. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN = Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2019;(1):57–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.57-61>
6. Zemtsovsky A.V., Kuznetsov N.N., Pak A.K. Physical properties and fracture behavior of rocks in uniaxial and triaxial compression: A case-study of Zhdanovskoe deposit, Kola Mining and Metallurgical Company. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;773:012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012058>

**Информация об авторах**

**Козырев Анатолий Александрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Земцовский Александр Васильевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны Российской Федерации, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Кулькова Мария Сергеевна** – младший научный сотрудник лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны Российской Федерации, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

**Соннов Максим Александрович** – действительный член Академии горных наук, заместитель генерального директора, ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: sonnov@cae-fidesys.com

**Information about the authors**

**Anatoly A. Kozhyrev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Geomechanics, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation

**Alexander V. Zemtsovskiy** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Instrumental Studies of Rock Conditions in the Arctic Zone of the Russian Federation, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation

**Maria S. Kulkova** – Junior Researcher, Laboratory of Instrumental Studies of Rock Conditions in the Arctic Zone of the Russian Federation, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

**Maxim A. Sonnov** – Full-fledged Member of the Academy of Mining Sciences, Deputy Director General, Fidesys LLS, Moscow, Russian Federation; e-mail: sonnov@cae-fidesys.com

**Article info**

Received: 05.10.2021

Revised: 26.11.2021

Accepted: 29.11.2021