

**А.А. Козырев, И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева,
А.В. Пантелеев**

ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В РАЙОНЕ СААМСКОГО РАЗЛОМА*

Представлены результаты исследования геодинамической, сейсмической и геомеханической ситуации в окрестности крупного радиального разлома Хибинского массива, разделяющего два крупных апатит-нефелиновых месторождения – Кукисвумчоррское и Юкспорское. Проведена оценка факторов, повлиявших на активизацию сейсмической активности данного участка массива в 2016 г. Выполнен временной и пространственный анализ сейсмического режима в районе Саамского разлома за последние восемь лет и за последний год. Определены механизмы очагов сильных сейсмических событий 2016 г. Проведено трехмерное численное моделирование напряженно-деформированного состояния с учетом параметров исходного поля напряжений, сложного гористого рельефа дневной поверхности, свойств вмещающих пород, рудного тела и разломной структуры, а также фактического состояния открытых и подземных горных работ. Выявлено местоположение зон концентрации растягивающих напряжений, в которых процессы разрушения могут происходить с большей интенсивностью. Полученные результаты говорят о необходимости рассматривать участок массива между развивающимися очистными работами и телом разлома как блок-целик со всеми сопутствующими мероприятиями по его отработке. В дальнейшем при планировании горных работ на нижележащих горизонтах целесообразно с точки зрения безопасности и суммарной экономической эффективности подготовительных и добычных работ воспринимать Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения как единое рудное тело и отрабатывать запасы глубоких горизонтов Кировского рудника от Саамского разлома к флангам.

Ключевые слова: сейсмическая активность, геодинамика, напряженно-деформированное состояние, удароопасность, тектонические напряжения, подземные горные работы, численное моделирование.

* Исследования выполнены на основе данных и при финансовой поддержке АО «Апатит» в рамках сопровождения горных работ в удароопасных условиях.

В 2016 г. зафиксировано несколько сейсмических событий с энергией более 10^6 Дж в районе Саамского разлома, который является одним из наиболее крупных радиальных субвертикальных разломов Хибинского массива. Данный разлом проходит по Саамской долине и одноименному карьеру, работы в котором на сегодняшний день завершены (рис. 1). Фактически он является разделом между Кукисвумчоррским и Юкспорским месторождениями, отрабатываемыми подземным способом на высотных отметках близких к отметке дна карьерной выемки. Развитие горных работ идет от центра к флангам, что считается оптимальным по геомеханическим условиям на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, к которым отнесены отрабатываемые месторождения Хибин [1, 2].

Рассматриваемый участок приурочен к долине реки Саамка и представлен характерным для Кукисвумчоррского месторождения комплексом пород: подстилающие уртиты, рудная залежь, покрывающие трахитоидные уртиты и рисчорриты. Простираение рудного тела субмеридиональное. Представление о геологической ситуации дает структурно-геологический план горизонта +252 м и продольный разрез М+600 Кукисвумчоррского месторождения (рис. 2). Тело разлома является неоднородной зоной дробления, катаклаза и милонитизации мощностью в пределах карьера от нескольких до сотни метров, внутри которой находятся многочисленные блоки, линзы и грубообломочные куски шпреуштейнезированных вмещающих горных пород; по падению разлом прослежен в карьере и в подземных выработках Кировского рудника более чем на 200 м [3].



Рис. 1. Выход Саамского разлома в карьерное пространство

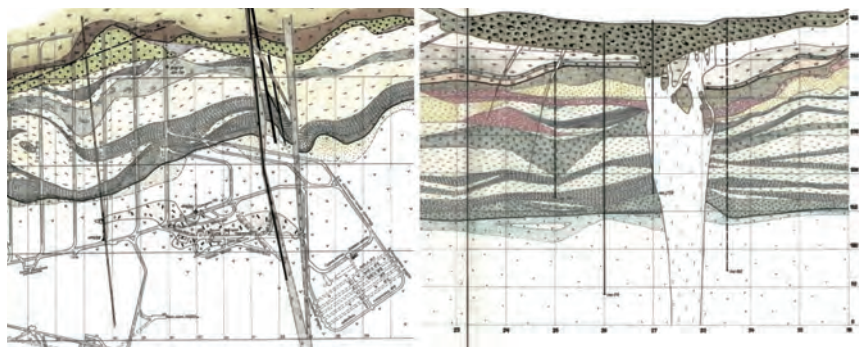


Рис. 2. Структурно-геологический план гор.+252 м и продольный геологический разрез по М+600

Данный комплекс по нормали пересекает серия субвертикальных окисленных зон и мончикитовых даек. Из последних структур северная — наиболее протяженная, выдержанная по мощности и является составной частью северной зоны разлома. Между разломами и к югу от зоны разлома отмечаются плитчатые нарушения пластов.

Эпицентры сейсмических событий с энергией 10^5 Дж и более (по данным бюро геофизического мониторинга АО «Апатит») приурочены к зоне влияния разлома, на отметках +150 ÷ +200 м,

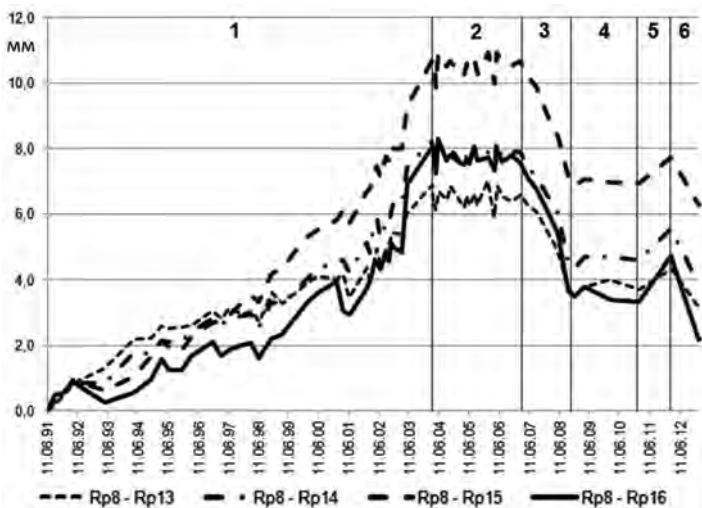


Рис. 3. Вертикальные перемещения реперов полигона гор. +252 м в пределах Саамского разлома [4]

в породах лежащего бока, в непосредственной близости от промплощадки рудника. События ощущались на промплощадке. Нарушений подземных выработок, явно связанных с зарегистрированными событиями, не установлено.

Величина водопритоков в подземных выработках рассматриваемого района на данных отметках не имеет ощутимой сезонной зависимости, так как частично обусловлена фильтрацией воды из прудка Саамского карьера, который не промерзает в зимний период, а массив, расположенный под промплощадкой, перекрытый моренными отложениями, имеет незначительную площадь водосбора.

Саамский радиальный разлом глубиной заложения до 30 км, протяженностью около 10 км, можно отнести к сбросо-сдвигу. Юкспорское крыло смещено на юго-запад по горизонтали до 50 м, а по вертикали опущено до 60 м. Исходя из суммарной мощности зоны разлома, фрагментам включения в него материнского тела, можно предположить, что данное смещение происходило и происходит в течение длительного геологического времени с различной интенсивностью, в том числе и скачкообразно. На отметке +90 м разлом, заполненный рыхлой массой шпреуштейнезированных пород, сохраняет значительную мощность (более 10 м).

С 1990 г. в районе Саамского разлома проводились нивелирные, а с 1995 г. по 2012 г. — светодальномерные измерения, зафиксировавшие устойчивую динамику реперов, установленных в заполнителе разлома, со скоростями до 0,7 мм/год. В период 2004—2007 гг. наблюдалась стабилизация; в 2007 г. зафиксирова-

Распределение событий по энергетическим классам

	Энергетический класс событий (К)			
	4	5	6	7
2008	18	1		
2009	19	2		
2010	15	6		
2011	11	4	2	
2012	12	7	1	
2013	43	12	1	
2014	16	10		
2015	43	29		
2016	16	4	3	2

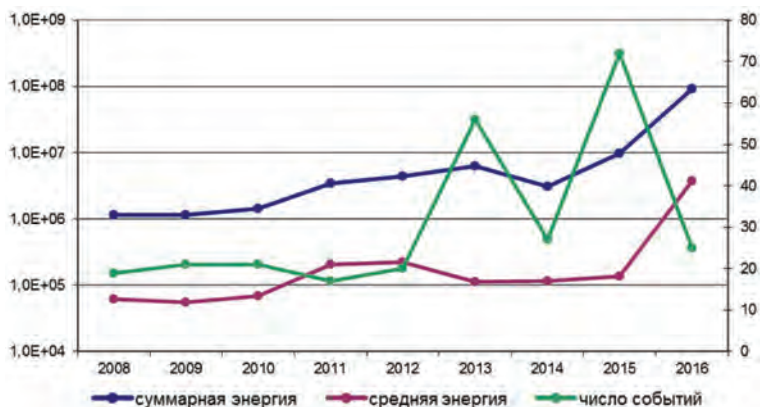


Рис. 4. Сейсмическая активность в районе Саамского разлома в 2008–2016 гг.

но опускание реперов; 2008–2011 гг. очередной период стабилизации и незначительный подъем [4]. В дальнейшем наблюдения были приостановлены.

Анализ сейсмических событий за период 2008–2016 гг. показал, что рост значений энергетических характеристик начался в 2010 г. и происходил ежегодно с пиками в 2013 и 2015–2016 гг. Причем в 2016 г. при снижении суммарного числа событий увеличилась их суммарная энергия (рис. 4). Изменение энергетического класса событий происходило постепенно, год за годом (таблица). Временной анализ сейсмичности в районе Саамского разлома показал, что, по-видимому, происходила подготовка сильных сейсмических событий. Значительный рост числа

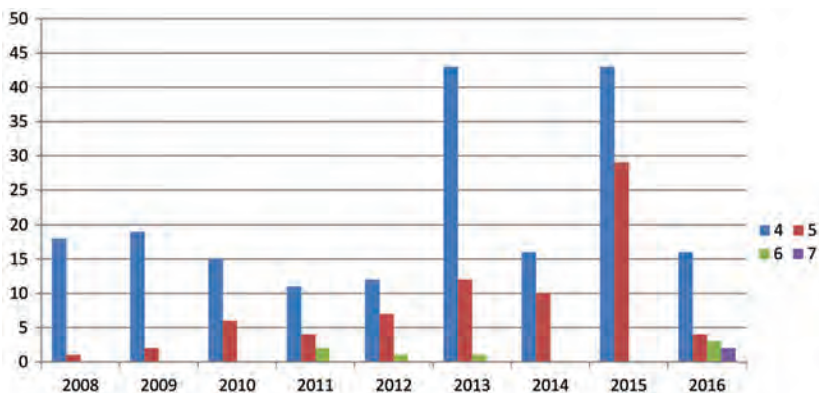


Рис. 5. Распределение событий по энергетическим классам K в районе Саамского разлома

событий с энергией от 10^4 до 10^5 Дж привел к тому, что начали происходить события с энергией более высокого порядка (10^6 – 10^7 Дж).

Пространственный анализ сейсмического режима в районе Саамского разлома за период наблюдений 2008–2016 годы показал, что сейсмические события проявляются как по отдельности, так и группами, и по-видимому, наблюдается эффект миграции сейсмической активизации вдоль разломных структур [5, 6].

На рис. 6 представлены совместно данные о сейсмичности в районе Саамского разлома в 2016 г. и о ведении взрывных работ по проходке выработок вблизи него. Рассмотрены представительные события с энергией от 10^4 Дж. По магистрали выбран диапазон, охватывающий область проявления мощных событий в 2016 г. (рис. 7).

Ретроспективный анализ связи сейсмической активности с сезонностью показал, что два всплеска сейсмической активности в 2013 г. и в 2015 г. наблюдаются в летний период (активи-

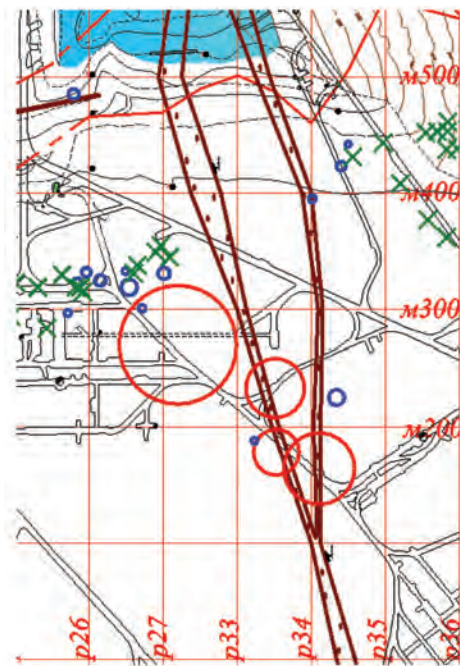


Рис. 6. Сейсмособытия и места ведения проходческих работ в районе Саамского разлома. Проекция на план горизонта +170 м

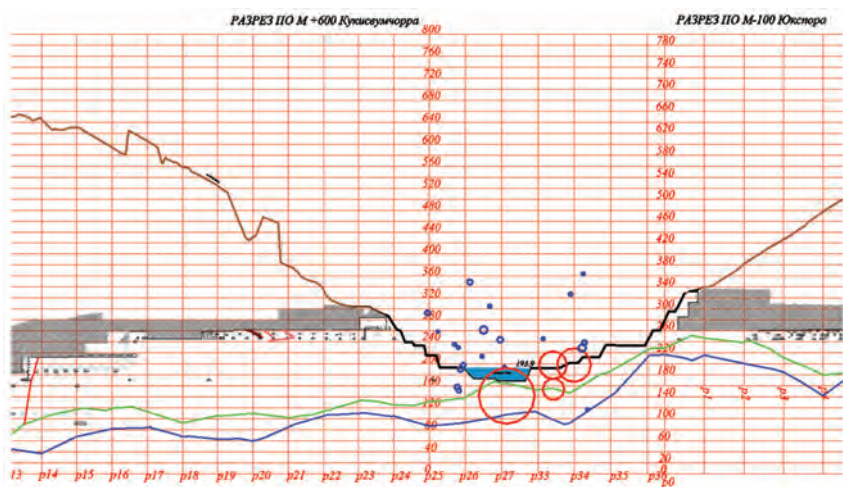


Рис. 7. Проекция местоположения представительных сейсмических событий 2016 г. в районе Саамского разлома на разрез по простиранию рудной залежи

зация сейсмичности в июне и спад в сентябре), тогда как наиболее мощные события произошли в апреле и октябре 2016 г.

Рассмотрены механизмы очагов сильных сейсмических событий, зарегистрированных в течение 2016 г. В соответствии с выбранной моделью построения механизмов очагов для событий 16.04.2016 7:52 и 14.10.2016 17:57 есть два равновероятных варианта: первый — в очаге сейсмического события произошел взброс, второй — сброс. Для событий 16.04.2016 8:29 и 16.04.2016 11:05 тип механизма очага — комбинированный, в очаге сейсмического события произошел взбросо-сдвиг.

Особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) в районе Саамского разлома определяются как влиянием самой разломной структуры сложной геометрии, так и расположением участка под Саамской долиной в окрестности карьерной выемки. Расчеты НДС выполнены с использованием программного комплекса SigmaGT, реализующего метод конечных элементов в объемной постановке [9]. В зарубежной практике также успешно применяются численные модели, учитывающие геологические и горнотехнические факторы и дающие возможность оценки геомеханического состояния массива пород [10–11].

В целом средний уровень сжимающих напряжений на рассматриваемом участке ниже, чем под гористой частью массива и составляет 25–30 МПа на горизонте +170 м. Зона concentra-

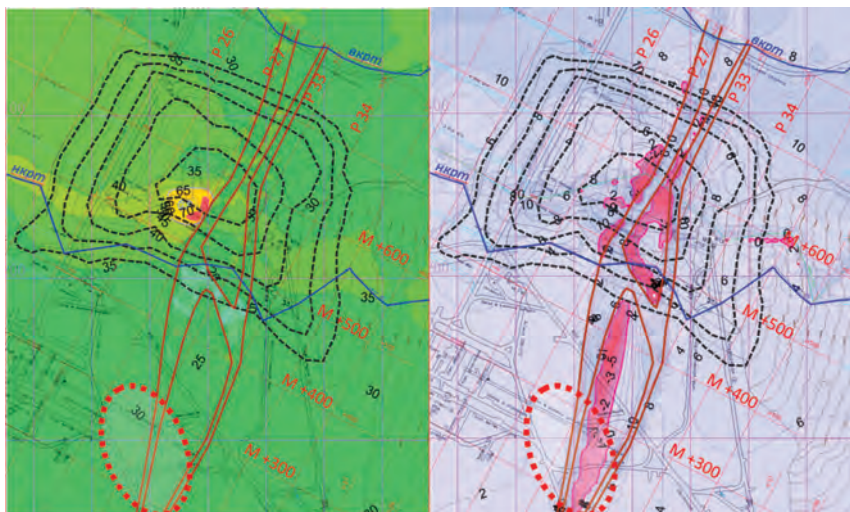


Рис. 8. Распределение максимальной и минимальной компонент главных напряжений на горизонте +170 м



Рис. 9. Вектора максимальной компоненты главных напряжений на горизонте +170 м

ции $\sigma_{\max}$ расположена под дном Саамского карьера (проекция карьера показана черным пунктиром), более высокие величины напряжений имеют место со стороны Кукисвумчоррского месторождения, где развитие подземных горных работ опережает выемку запасов Юкспорского месторождения (рис. 8).

Для минимальной компоненты напряжений характерны величины, соответствующие собственному весу пород с зонами растяжений между ветвями Саамского разлома и на отдельных участках по контакту разлома и вмещающих пород. Кроме того, имеет место сложная картина векторного распределения напряжений с изменением направления действия $\sigma_{\max}$ в теле разлома практически перпендикулярно его простиранию (рис. 9).

Таким образом, зона мощных сейсмических событий 2016 г. (показана красным пунктиром) удалена от зон концентрации напряжений $\sigma_{\max}$, а приурочена скорее к одной из областей растягивающих напряжений между ветвями Саамского разлома.

Следует отметить, что наиболее крупные сейсмические события, а именно техногенные землетрясения 1989 и 2010 гг. произошли в лежачем боку рудной залежи на значительном удалении (не менее 200 м) от очистных выемок вблизи структурных нарушений массива [7, 8]. С этой точки зрения сейсмические события в окрестности Саамского разлома 2016 г. с энергией $>10^6$ Дж могут являться предвестниками сейсмического события более высокого ранга. Еще одним негативным фактором является наращивание объемов выемки полезных ископаемых на Кировском руднике в последние несколько лет, что приводит к повышению техногенной сейсмичности региона.

Принимая во внимание значительную мощность разлома и его тектоническую активность, участок между ним и фронтами очистных работ следует рассматривать как блок-целик со всеми сопутствующими мероприятиями. При отработке нижележащих горизонтов целесообразно, с точки зрения безопасности и суммарной экономической эффективности подготовительных и добычных работ, воспринимать Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения как единое рудное тело и рассмотреть возможность отработки запасов глубоких горизонтов Кировского рудника от Саамского разлома к флангам.

В результате комплексного анализа геологических, сейсмических и геомеханических данных были сделаны следующие выводы:

- Саамский радиальный разлом глубиной заложения до 30 км, протяженностью около 10 км, можно отнести к сбросо-сдвигу.

На отметке +90 м разлом, заполненный рыхлой массой шпреуштейнезированных пород, сохраняет значительную мощность.

- Сейсмические события 2016 г. с энергией более 10^6 Дж, приурочены к подстилающим породам лежащего бока на уровне или ниже прудка Саамского карьера.

- События сконцентрированы вне зоны влияния очистных работ, что предполагает доминирующее влияние в увеличении суммарной энергии событий исходного поля напряжений.

- События (подвижки), реализуемые по разлому, как пластичные, так и скачкообразные способны привести к разрушению контура выработок, нарушению функционирования установленного в этих выработках оборудования.

- Наиболее благоприятные условия для аккумуляции энергии расположены в зоне пониженного влагонасыщения в районе промплощадки рудника.

- Сейсмические события в окрестности Саамского разлома 2016 г. с энергией более 10^6 Дж могут являться предвестниками сейсмического события более высокого ранга.

- Целесообразно, с точки зрения безопасности и суммарной экономической эффективности подготовительных и добычных работ, воспринимать Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения как единое рудное тело и рассмотреть возможность отработки запасов глубоких горизонтов Кировского рудника от Саамского разлома к флангам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99).* — М, 2000.

2. *Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения).* — Апатиты-Кировск, 2010. — 117 с.

3. *Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Жиров Д. В., Смагина Ю. Г.* Саамский разлом (Хибины) — аномальный характер современных деформаций // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12. — № 4. — С. 702–707.

4. *Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Федотова Ю. В.* Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 4. — С. 168–191.

5. *Шерман С. И.* Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. — Новосибирск: Гео, 2014. — С. 353.

6. *Уломов В. И.* Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техно-

генные катастрофы. Монография в 8 т. Ред. акад. Н.П.Лаверов, коллектив авторов. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. Отв. ред. акад. А.О. Глико. — М.: ИФЗ РАН, 2008. — 404 с.

7. *Тряпицын В. М., Шабаров А. Н.* Современная тектоника и геодинамика Хибин. Монография. — Кострома: Авантитул, 2007. — 146 с.

8. *Козырев А. А., Каган М. М., Константинов К. Н., Жиров Д. В.* Изменения деформаций и наклонов геоструктурного блока в процессе подготовки и реализации техногенного землетрясения // Записки горного института. — 2012. — т. 199. — С. 230—235.

9. *Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э.* Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений // Записки Горного института. — 2012. — Т. 198. — С. 16—23.

10. *Stacey T. R.* Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions. Slope Stability 2007. pp 187—200.

11. *Stead D., Coggan J. S., Elmo D., Yan M.* Modelling Brittle Fracture in Rock Slopes — Experience Gained and Lessons Learned. Slope Stability 2007, pp. 239—252. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Козырев Анатолий Александрович*¹ — доктор технических наук, профессор, зам. директора, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,

*Семенова Инна Эриковна*¹ — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,

*Журавлева Ольга Геннадьевна*¹ — кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru,

*Пантелеев Алексей Владимирович*¹ — ведущий инженер, e-mail: PanteleevAV@goi.kolasc.net.ru,

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 247—258.

UDC
551.2/.3+
622.83

A.A. Kozyrev, I.E. Semenova, O.G. Zhuravleva, A.V. Panteleev **ASSESSMENT OF GEODYNAMIC AND SEISMIC** **SITUATION NEAR THE SAAMSKY FAULT**

The paper presents the investigation result of geodynamic, seismic and rockmechanical situation near large radial fault of Khibiny rock massif that separates two large Kukisvumchorr and Yukspor apatite-nepheline deposits. The authors investigated the factors that influenced the seismic activity of the rock massif area in 2016. Temporal and spatial analysis of the seismic regime in the area of Saamsky fault over the past eight years and for the last year was made. Sources mechanisms of strong seismic events in 2016 was defined. The 3D numerical modeling of stress-strain state takes into account the parameters of the initial stress field, a complex mountainous terrain the earth's surface, the properties of the enclosing rocks, the ore body and the fault structures, as well as the actual state of open pit and underground mining operations. Location zones of concentration of tensile stresses was found. Destruction processes can occur with great intensity in this zones.

The obtained results show that it is necessary to consider rock massif area between deepening stoping and the body of fault as a pillar. When planning of mining operations on the lower horizons Kukisvumchorr and Yukspor deposits should be considered as a single ore body. Mining operation should be carried out from the Saamsky fault to the flanks. This will provide the safety and economic efficiency.

Key words: seismic activity, geodynamic, stress-strain state, rockburst hazard, tectonic stresses, underground mining, numerical modeling.

AUTHORS

Kozyrev A.A.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director, e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru,

Semenova I.E.¹, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: innas@goi.kolasc.net.ru,

Zhuravleva O.G.¹, Candidate of Technical Sciences, Researcher, e-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru,

Pantelev A.V.¹, Leading Engineer, e-mail: PantelevAV@goi.kolasc.net.ru,

¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

Studies are based on the data and with the financial support of JSC «Apatite» in the framework of support of mining works in rockburst-hazardous conditions.

REFERENCES

1. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornyykh rabot na rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniyakh, ob"ektakh stroitel'stva podzemnykh sooruzheniy, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (RD 06-329-99)* (Instructions for safe mining operations at ore and non-metallic deposits, objects of construction of underground structures, prone and dangerous mountain blows (RD 06-329-99)), Moscow, 2000.
2. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornyykh rabot na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (Khibinskie apatit-nefelinovyie mestorozhdeniya)* (Instructions on safe conducting mountain works on deposits prone and dangerous mountain blows (the Khibiny Apatite-nepheline deposits)), Apatity-Kirovsk, 2010, 117 p.
3. Kozyrev A. A., Kaspar'yan E. V., Zhirov D. V., Smagina Yu. G. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. vol. 12, no 4, pp. 702–707.
4. Kozyrev A. A., Kaspar'yan E. V., Fedotova Yu. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 4, pp. 168–191.
5. Sherman S. I. *Seysmicheskiy protsess i prognoz zemletryaseniy: tektonofizicheskaya kontseptsiya* (Seismic process and earthquake prediction: Tectonophysics concept), Novosibirsk, Geo, 2014, pp. 353.
6. Ulomov V. I. *Izmenenie okruzhayushchey sredy i klimata. Prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennyye katastrofy*. Monografiya, t. 1 (Environmental change and climate. Natural and related technogenic catastrophes. Monograph. vol. 1), Moscow, IFZ RAN, 2008, 404 p.
7. Tryapitsyn V. M., Shabarov A. N. *Sovremennaya tektonika i geodinamika Khibin*. Monografiya (Modern tectonics and geodynamics of the Khibiny. Monograph), Kostroma, Avantiul, 2007, 146 p.
8. Kozyrev A. A., Kagan M. M., Konstantinov K. N., Zhirov D. V. *Zapiski gornogo instituta*. 2012, vol. 199, pp. 230–235.
9. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012, vol. 198, pp. 16–23.
10. Stacey T. R. Slope Stability in High Stress and Hard Rock Conditions. *Slope Stability*. 2007, pp 187–200.
11. Stead D., Coggan J. S., Elmo D., Yan M. Modelling Brittle Fracture in Rock Slopes — Experience Gained and Lessons Learned. *Slope Stability*. 2007, pp. 239–252.