УДК 622.284

А.Д.КУРАНОВ, *аспирант,(812) 328-86-25, kuranov555@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.D.KURANOV, *post-graduate student, (812) 328-86-25, kuranov555@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБОРТОВЫХ УЧАСТКОВ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ В ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ

Определены параметры напряженного состояния прибортового массива глубокого рудного карьера на примере разработки Коашвинского апатит-нефелинового месторождения. Исследование выполнено с помощью численного моделирования методом конечных элементов.

Ключевые слова: прибортовой массив, карьер, напряжения,тектонические напряжения.

DETERMINATION OF THE STRESS PARAMETERS OF NEARBORD AREAS OF OPEN PITS, LOCATED IN HIGHLY STRESSED ROCK MASSIF

The parameters of the stress state of nearboard massif of deep ore pitas an example the development of apatite-nepheline Koashvinskoe deposis. This research was performed by numerical simulation using finite elements method.

Key words: nearbord massif, open pit, stress, tectonic stresses.

Современный период освоения месторождений рудных полезных ископаемых открытым способом характеризуется тем, что на большинстве месторождений карьеры приближаются к своим предельным контурам. Определение безопасных параметров систем разработки прибортовых запасов месторождений подземным способом приобретает все большее научное и практическое значение. Исследования данной проблемы особенно актуальны для северных регионов страны, в частности, апатит-нефелиновых месторождений Кольского полуострова, большую часть которых разрабатывают или будут разрабатывать комбинированными открыто-подземным или совмещенным способами (зоны стыковки между кукисвумчоррской и юкспорской частями объединенного Кировского рудника и Саамским карьером между Расвумчоррским рудником и карьером Центрального рудника, отработка прибортовых и подкарьерных запасов Коашвинского, Ньорпахского месторождений и месторождения «Олений ручей») [5]. В этой связи становится весьма значимой задача установления степени и характера влияния карьера на устойчивость подземных выработок [3, 4]. Однако в этих работах не рассматриваются особенности формирования пространственного напряженно-деформированного состояния прибортовых массивов, от параметров которого и зависит устойчивость выработок и элементов систем разработки прибортовых запасов. Вместе с тем, расчеты устойчивости бортов карьеров в практике разработки рудных месторождений и расчеты параметров систем подземной разработки и устойчивости под-

земных выработок должны быть связаны с фактическим состоянием массива, так как практика добычи руды открытым способом в высоконапряженных массивах свидетельствует о постоянном изменении структурного строения отдельных участков, которые происходят под влиянием трансформации поля напряжений [8].

Известно, что карьерная выемка вызывает перераспределение напряжений и формирование зон разгрузки по компоненте, перпендикулярной к поверхности откоса, и зон концентрации горизонтальных напряжений в борту карьера по компоненте, параллельной поверхности откоса борта, а также концентрацию горизонтальных напряжений в донной части карьера [1].

Для отработки апатит-нефелиновых месторождений Кольского полуострова характерной особенностью является наличие поля тектонических напряжений, горизонтальные составляющие которого значительно превышают составляющие гравитационного поля напряжений. Исследованиями установлено [6], что наложение тектонических напряжений на поле гравитационных значительно изменяет геомеханическую обстановку в прикарьерном массиве. Изменение заключается в увеличении абсолютных значений концентраций напряжений, направления действия напряжений и развороте тензора напряжений в целом. В связи с этим особую актуальность представляет определение параметров пространственного поля напряжений, формирующегося в приконтурном массиве карьера.

В качестве метода исследований принято численное моделирование методом конечных элементов. Метод не находит широкого применения в практике расчетов устойчивости бортов карьеров, однако его применение целесообразно для определения параметров напряженного состояния параметров систем разработки или для определения параметров поля напряжений в прибортовом массиве до начала подземных работ [6].

Для учета широкого круга факторов, влияющих на параметры напряженного состояния прибортового массива, разработан ряд объемных конечно-элементных моделей (рис.1).

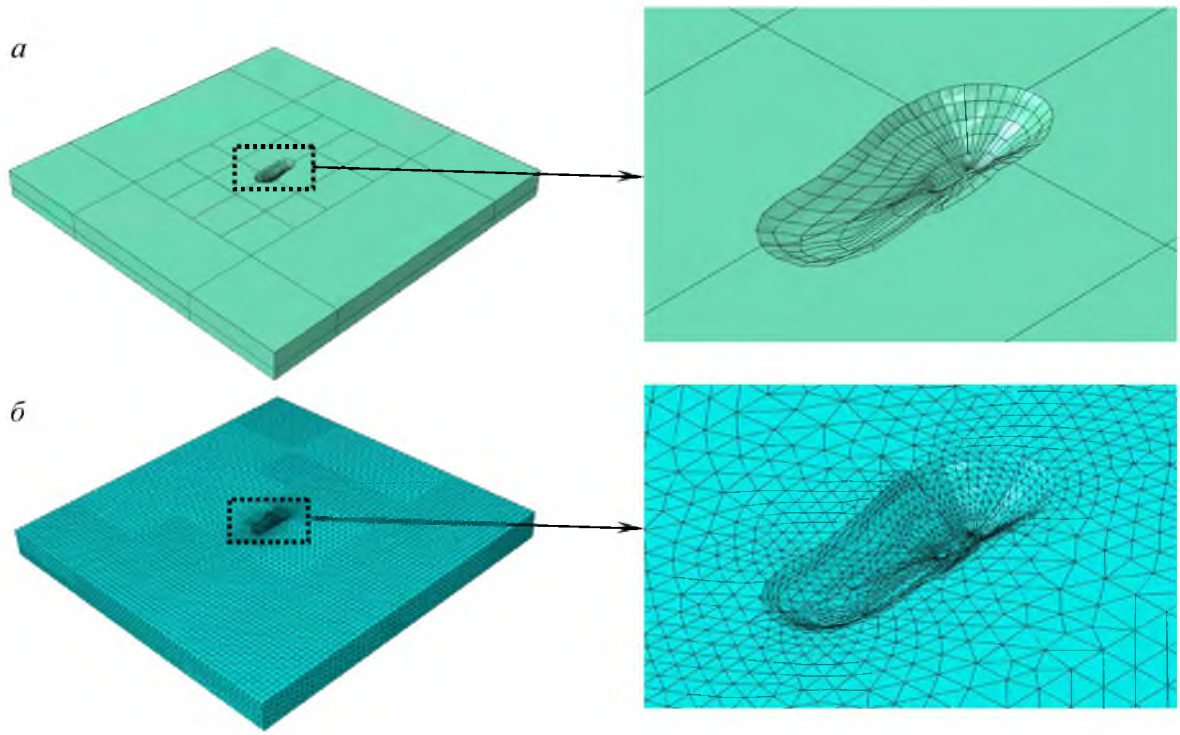


Рис.1. Общий вид разработанных конечно-элементных моделей: *а* – твердотельная модель; *б* – сетка конечных элементов

Размеры моделей составляют 25000××25000×2000 м. Тип элементов – десятиузловые тетраэдры. Для оценки степени и характера влияния тектонического поля напряжений на напряженное состояние приконтурного массива модели разрабатываются для двух вариантов граничных и начальных условий: с учетом только гравитационного поля напряжений; с учетом гравитационного и тектонического полей напряжений.

Массив задавался как однородный изотропный, линейно деформируемый, весомый материал с модулем упругости $E = 50000$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0{,}27$, удельным весом $\gamma = 0{,}03$ МН/м^3.

В первом случае граничные условия задаются следующим образом: на все грани модели, кроме грани, соответствующей дневной поверхности, накладывается запрет перемещений по соответствующим направлениям. Во втором случае для учета тектонического поля напряжений необходимо ввести дополнительные условия. Для начала необходимо конкретизировать величину и изменчивость составляющих тектонического поля напряжений по различным направлениям. По результатам анализа нормативной и научной литературы [2, 6, 7] для условий отработки рудников Кольского полуострова (в частности, Коашвинского месторождения и месторождения «Плато Расвумчорр») получены следующие величины напряжений в массиве по различным направлениям:

Глубина от поверхности	5	50	250	450	650
Величина напряжений по направлению простирания рудного тела, МПа	5	45	54	60	66
Величина напряжений по направлению вкрест простирания рудного тела, МПа	2,5	20	28	35	40

По приведенным данным путем аппроксимации определены логарифмические функции изменения величины напряжений с глубиной по направлениям по простиранию и вкрест простирания рудного тела. Графики функций приведены на рис.2. Функции имеют следующий вид:

• величина тектонических напряжений в направлении простирания рудного тела, МПа,

$$\sigma_{т}^{прост}(H) = 11{,}84\ln(H) - 9{,}97; \qquad (1)$$

• величина тектонических напряжений в направлении вкрест простирания рудного тела, МПа,

$$\sigma_{т}^{вкрест}(H) = 7{,}30\ln(H) - 9{,}38. \qquad (2)$$

Полученные функции использованы в конечно-элементных моделях, учитывающих тектоническое поле напряжений.

Для анализа величины и направлений действующих в приконтурном массиве напряжений модель разбита горизонтальными плоскостями на слои мощностью 100 м. На рис.3-6 приведены графики распределения компонент главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3 в плоскости, расположенной на глубине 300 м.

Для конкретизации параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива определены направления действия главных напряжений в рассматриваемой плоскости, расположенной на глубине 300 м (рис.7-9).

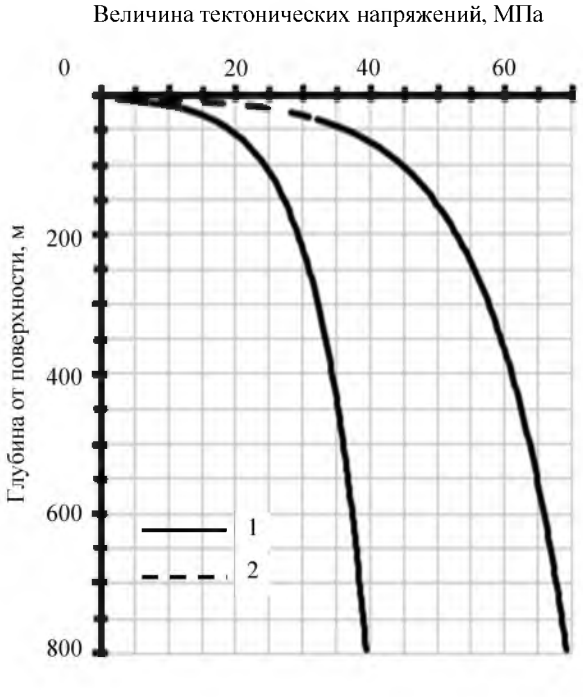


Рис.2. График изменения величины тектонических напряжений с увеличеснием глубины разработки: в направлении простирания рудного тела (1); вкрест простирания рудного тела (2)

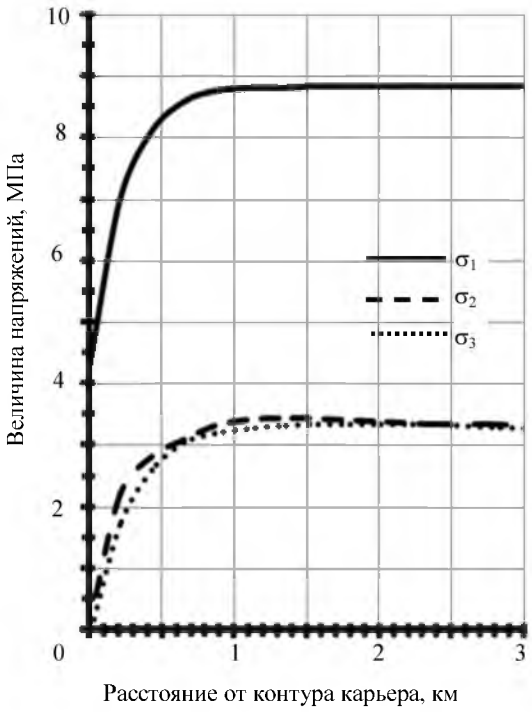


Рис.3. Распределение главных напряжений в направлении продольной оси карьера без учета тектонической составляющей

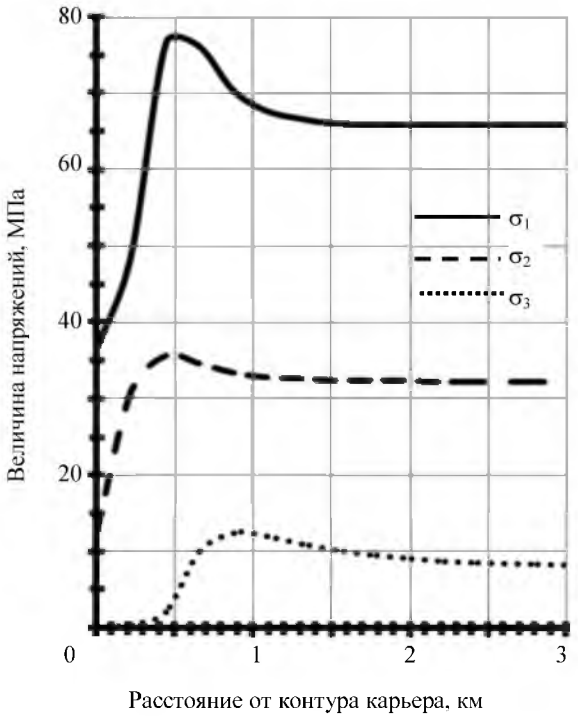


Рис.4. Распределение главных напряжений в направлении продольной оси карьера с учетом тектонической составляющей

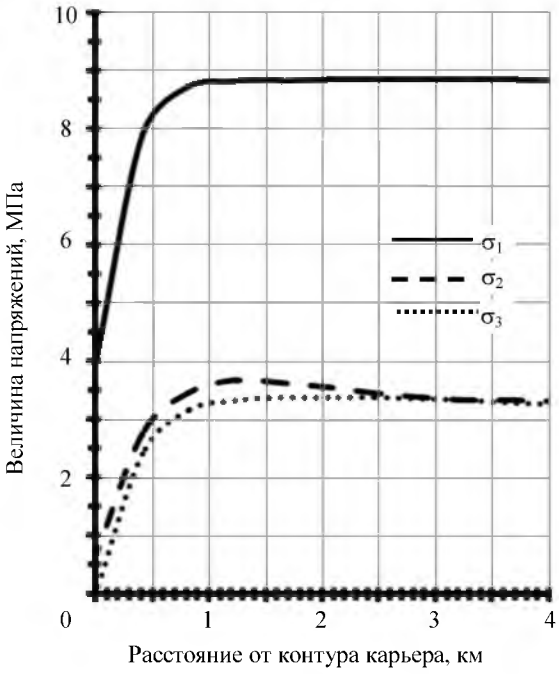


Рис.5. Распределение главных напряжений в направлении поперечной оси карьера без учета тектонической составляющей

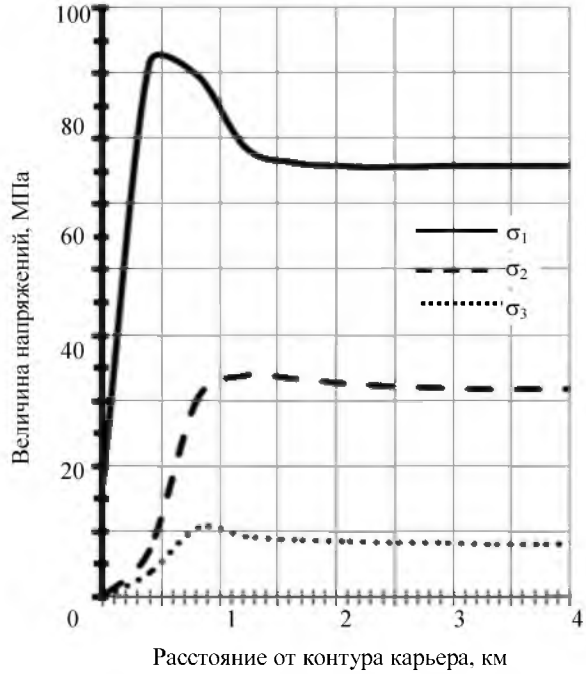


Рис.6. Распределение главных напряжений в направлении поперечной оси карьера с учетом тектонической составляющей

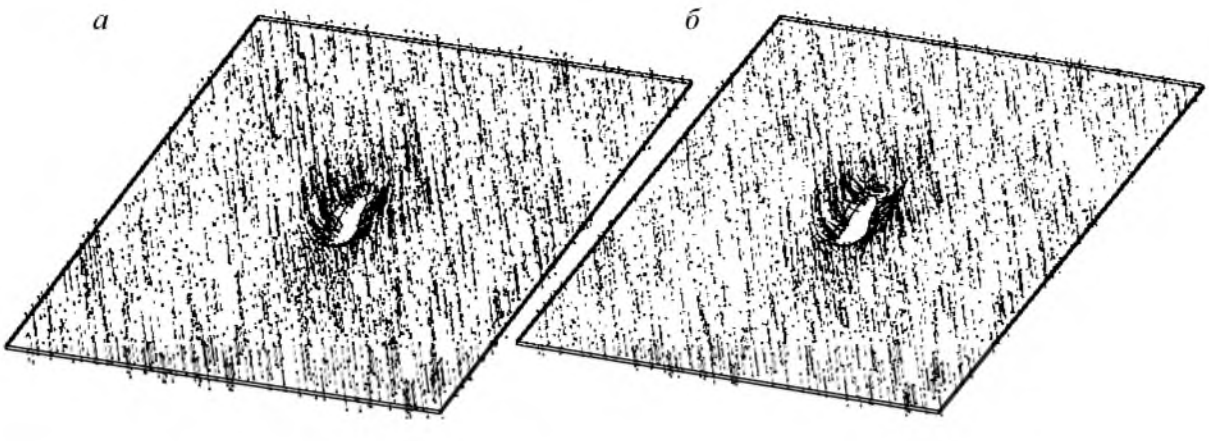


Рис.7. Направления главных напряжений σ_1 в сечении на глубине 300 м без учета (*а*) и с учетом (*б*) тектонических напряжений

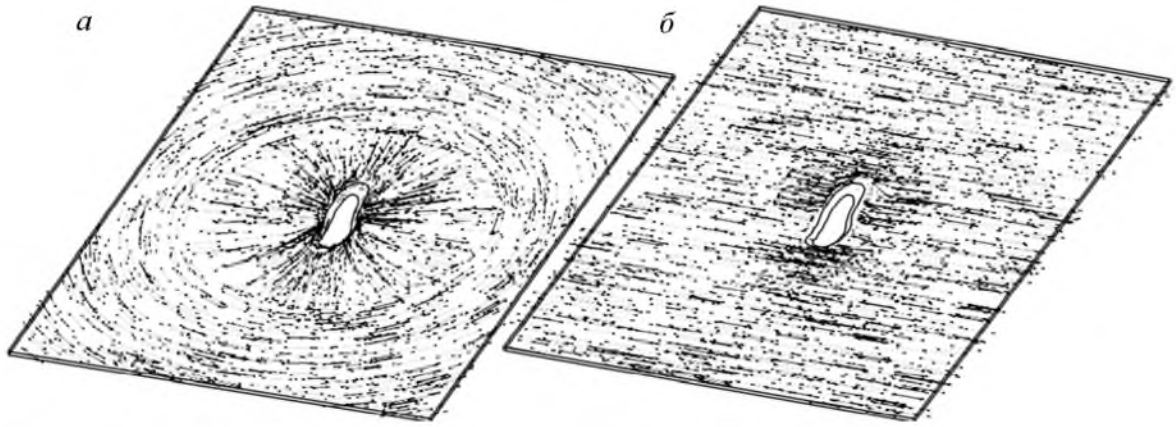


Рис.8. Направления главных напряжений σ_2 в сечении на глубине 300 м без учета (*а*) и с учетом (*б*) тектонических напряжений

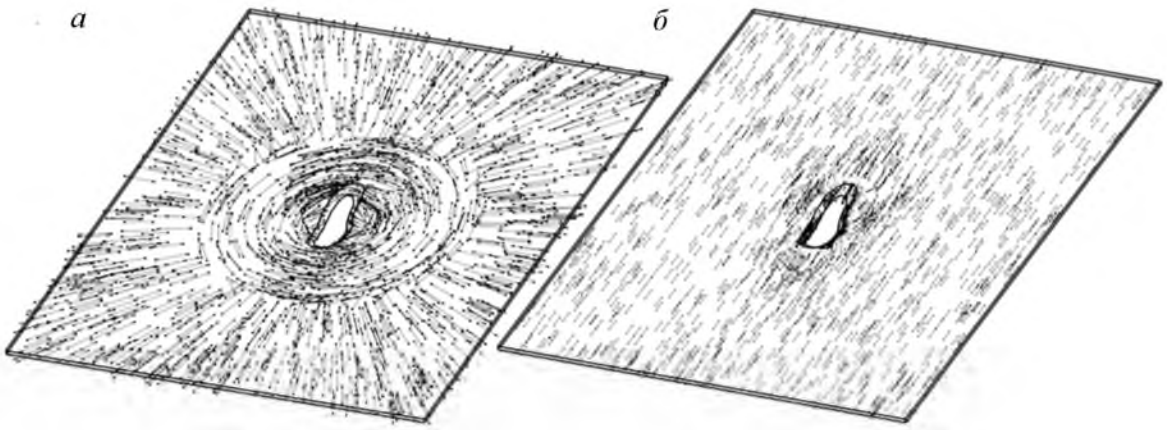


Рис.9. Направления главных напряжений σ_3в сечении на глубине 300 м без учета (*а*) и с учетом (*б*) тектонических напряжений

Анализ полученных зависимостей распределения главных напряжений в прикарьерном массиве позволяет заключить, что существуют значительные отличия в формировании напряженного состояния приконтурного массива в условиях действия тектонических напряжений по сравнению с вариантом расчета, в котором тектонические напряжения не задаются. На некотором расстоянии от борта карьера формируются зоны концентрации напряжений, в то время как непосредственно приконтурный массив разгружен от напряжений. Напряжения σ_1, которые направлены по вертикальной касательной к контуру карьера для обоих вариантов расчета, не формируют концентрацию напряжений для варианта расчета без учета тектонических напряжений. Напряжения σ_3 не формируют концентрацию напряжений для варианта расчета без учета тектонических напряжений. Только напряжения σ_2 формируют незначительную зону концентрации при расчете без учета тектонических напряжений, направлены они при этом по нормали к поверхности борта карьера. При расчете с учетом тектонической составляющей поля напряжений все компоненты σ_1, σ_2, σ_3 формируют зоны незначительной концентрации.

Можно заключить, что в зоне влияния карьера в случае расположения его в высоконапряженном массиве, компоненты поля напряжений имеют направления, несколько отличающиеся от соответствующих направлений компонент напряжений в зоне влияния карьера при расчете без задания тектонических напряжений. Причем в наибольшей степени это касается напряжений σ_2 и σ_3, главные максимальные напряжения σ_1 меняются количественно – возрастают, при этом их направление меняется не настолько интенсивно. Напряжения σ_1 направлены по вертикальной касательной к поверхности борта карьера, σ_3 – по направлению горизонтальной касательной к поверхности борта карьера, σ_2 – перпендикулярно поверхности борта карьера.

Следует отметить особенности формирования зоны влияния карьера. По графической интерпретации результатов расчета (рис.7-9) четко прослеживается геометрия зоны влияния карьерной выемки, которая для варианта расчета без задания тектонических напряжений имеет относительно правильные геометрические очертания, а при варианте расчета с заданием тектонических напряжений геометрия зоны влияния карьерной выемки в большей степени зависит от геометрии самого карьера.

Очевидно, что затронутая в статье проблема требует дальнейшего изучения. В частности, необходимо рассмотреть особенности напряженного состояния приконтурного массива с учетом его блочности, гидрогеологических факторов и слоистости. Результаты выполненного исследования служат отправной точкой для указанных задач.

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каплунов Д.Р.* Комбинированная геотехнология / Д.Р.Каплунов, В.Н.Калмыков, М.В.Рыльникова. М., 2003.

2. Напряженное состояние массива пород в придонной части глубокого карьера / А.А.Козырев, В.В.Павлов, В.А.Мальцев, С.Н.Савченко // Открытоподземная разработка мощных рудных месторождений: Сб. науч. тр. КНЦ РАН. Апатиты, 1995.

3. *Огородников Ю.Н.* Напряженно-деформированное состояние массива вокруг подготовительных выработок при отработке прибортовых запасов карьера Коашва / Ю.Н.Огородников, В.И.Очкуров, А.Д.Куранов // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Тр. 8-й междунар. науч.-практич. конф. Воркута, 2010. Т.1.

4. *Огородников Ю.Н.* Геомеханическое обоснование устойчивости подготовительных выработок при разработке прибортовых запасов Коашвинского карьера с обрушением подрабатываемого борта / Ю.Н.Огородников, А.Д.Куранов // Записки Горного института. СПб, 2011. Т.190.

5. *Свинин В.С.* Геомеханическое обоснование технологии и систем контроля массива пород при отработке стыковочных зон подземным и открытым способом (на примере апатитовых рудников Хибин): Автореф. дис. … канд. техн. наук. Апатиты, 2003.

6. *Сидоров Д.В.* Оценка напряженного состояния междуштрековых целиков на рудниках ОАО «Апатит» / Д.В.Сидоров, А.Д.Куранов // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, серия: «Науки о Земле». Вып 1. Тула, 2011.

7. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения) / КНЦ РАН. Апатиты – Кировск, 2010.

8. *Яковлев А.В.* Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве / А.В.Яковлев, Н.И.Ермаков; ИГД УрО РАН. Екатеринбург, 2006.

REFERENCES

1. *Kaplunov D.R., Kalmykov V.N, Rylnikova M.V.* Combined geotechnology. Moscow, 2003.

2. *Kozyrev A.A., Pavlov V.V., Maltsev V.A., Savchenko S.N.* The stress state of rock mass in the bottom of a deep pit // Open-powerful Underground ore deposits: Proceedings. KSC RAS. Apatity, 1995.

3. *Ogorodnikov J.N., Ochkurov V.I., Kuranov A.D.* Stress-strain state of the array around development workings when mining stocks pribortovyh career Koashva // Mineral resources of the North: Problems and Solutions: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference. Vorkuta, 2010. Vol.1.

4. *Ogorodnikov J.N., Kuranov A.D.* Geomechanical substantiation of the stability of development workings in the development of reserves pribortovyh Koashvinskogo career with the collapse of the undermined side / / Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2011. Vol.190.

5. *Svinin V.S.* Geomechanical substantiation of technology and control systems for rock mass-processing of docking zones underground and open pit (for example, apatite mines of Khibiny): Thesisreferat. Apatity, 2003.

6. *Sidorov D.V., Kuranov A.D.* Assessment of stress pillars in the mines of Open Society «Apatite» // Proceedings of Tula State University. Natural Sciences, Series: «Earth Science». Vol.1. Tula, 2011.

7. Guidelines for the safe conduct of mining activities on the deposits, prone and dangerous impact on the rock (the Khibiny apatite-nepheline deposits / KSC RAS. Apatity – Kirovsk, 2010.

8. *Yakovlev A.V., Ermakov N.I.* The stability of the boards of ore mines under the action of tectonic stresses in the array / Ural Branch of RAS Institute of Mining. Ekaterinburg, 2006.