© В.М. Лизункин, С.В. Шурыгин, М.В. Лизункин, 2015

УДК 622.831.312

В.М. Лизункин, С.В. Шурыгин, М.В. Лизункин

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА И ПОДЗЕМНОЙ КАМЕРЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ БЕДНОБАЛАНСОВЫХ УРАНОВЫХ РУД[*, **]

Месторождение Тулукуевское отрабатывали в 70–90 годы прошлого столетия открытым способом. Под дном карьера остались запасы урана с невысоким содержанием металла, которые отрабатывать в настоящее время традиционными подземными физико-техническими геотехнологиями, как показывает отечественная и мировая практика, является нерентабельным. Для доработки подкарьерых запасов месторождения разработана комплексная технология отработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами, которая предполагает магазинирование руды в подземной очистной камере с последующим ее выщелачиванием. При этом важной задачей является геомеханическое обоснование и оценка устойчивости бортов карьера и очистной камеры, для чего методом конечных элементов было промоделировано шесть моделей при разных условиях (фактическое состояние карьера, а также его воздействие при подземной разработке подкарьерых запасов системами с магазинированием и открытым очистным пространством). Исходными данными для моделирования были значения первоначальных напряжений горного массива, физико-механические свойства горных пород, геометрическое положение горных выработок. Результаты моделирования показали, что борта и дно карьера после отбойки очистной камеры будут находиться в устойчивом состоянии, а также в связи с высокими напряжениями в почве камеры на горизонте выпуска необходимо провести мероприятия по обеспечению устойчивости горных выработок.

Ключевые слова: урановые руды, блочное подземное выщелачивание, очистная камера, карьер, устойчивость, метод конечных элементов, моделирование, главные напряжения.

Постоянно снижающееся содержание полезного компонента в руде, увеличение с глубиной горных работ доли маломощных залежей и другие негативные факторы, влияющие на себестоимость конечной продукции, явились причиной создания более дешевых технологий отработки запасов урановых руд на основе геотехнологических методов.

Комплексная технология отработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами, предложенная ОАО «ППГХО» и ФГБОУ ВПО «ЗабГУ», для доработки остаточных запасов месторождения Тулукуевское, включает горно-подготовительные работы в блоке, блочное подземное выщелачивание отбитой руды, первичную переработку (рудосортировку) рентгенорадиометрическими сепараторами выданной на поверхность забалансовой рудной массы с текущей добычи, а также из

[*] В работе также принимала участие доцент кафедры РМПИ НИ «ИрГТУ» Е.Л. Сосновская.

[**] Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание комплексной технологии отработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами» при финансовой поддержке Правительства РФ (Минобрнауки России).

забалансовых отвалов предприятия, с выделением богатой части на гидрометаллургическую переработку, бедной – на кучное выщелачивание, непосредственно в карьере и штабеле, сформированном на поверхности. Из отсортированной пустой породы, складируемой в породный отвал, изготавливается щебень, используемый в последующем для собственных нужд предприятия [1].

Основные запасы месторождения Тулукуевское размещались вблизи поверхности и были отработаны открытым способом до максимально возможной глубины 250 м, при этом в днище карьера остались нетронутые запасы урановых руд. Оруденение представляет собой крутопадающее рудное тело жилообразной формы, имеюее мощность 13 м и протяженность до 140 м, выдержанное как по падению, так и по простиранию. Рудовмещающими породами на месторождении являются трахидациты, туфы и туфолавы трахидацитов. Вмещающие породы представлены покровами трахидацитов, их туфами и туфолавами, и андезито-базальтами нижнего покрова.

Отработка подкарьерных запасов методом блочного подземного выщелачивания требует решение ряда сложных задач, в том числе обеспечение устойчивости бортов карьера при формировании подземной камеры. В связи с этим было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива для условий комбинированной разработки по данным разрезов на вертикальную плоскость (по разведочным линиям 38, 39) (рис. 1).

Моделирование осуществлялось по программному комплексу FEM, разработанному профессором О.В. Зотеевым (ИГД УрО РАН). Программный

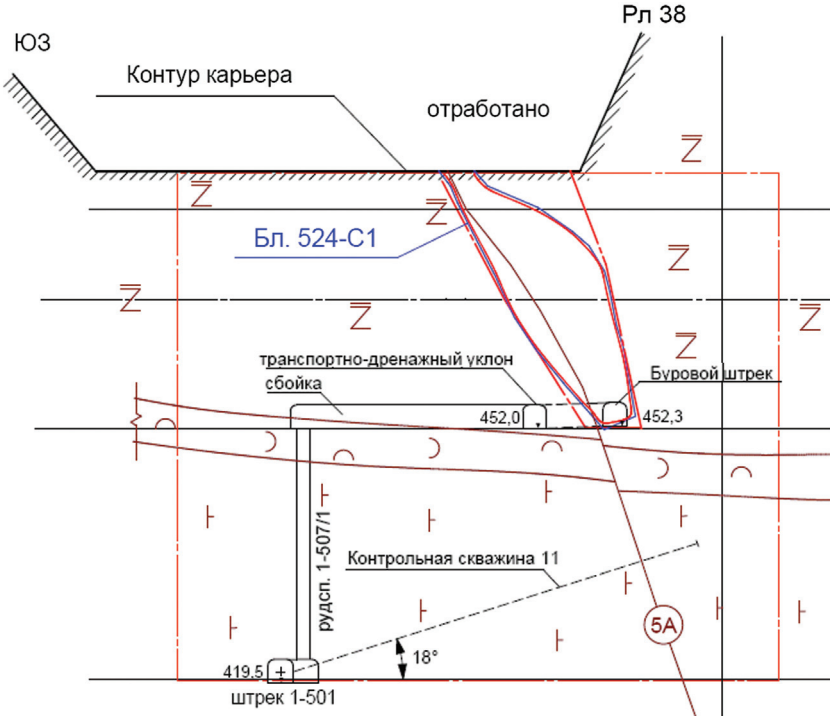

Рис. 1. Схема расположения камеры под карьером (разрез по разведочной линии 38)

комплекс FEM предназначен для решения плоских и объемных задач теорий упругости и пластичности методом конечных элементов [2]. По программному комплексу определяются зависимости изменения основных геомеханических показателей подрабатываемого массива и целиков, горных выработок.

Исходными данными для моделирования были значения первоначальных напряжений горного массива, физико-механические свойства горных пород, геометрическое положение горных выработок (глубина горных работ, формы и размеры камер).

Значения первоначальных напряжений принимались по данным натурных измерений первоначального напряженного состояния горных массивов на месторождении [3].

Величины напряжений аппроксимируются формулами:

$$\sigma_в = -1{,}01\gamma H, \quad \sigma_{пр} = -1{,}04\gamma H,$$
$$\sigma_п = -1{,}03\gamma H$$

где γ – плотность пород и руд, МН/м^3; $\sigma_в$ – вертикальные напряжения, $\sigma_{пр}$ – горизонтальные продольные напряжения, МПа; $\sigma_п$ – горизонтальные поперечные напряжения, МПа; H – глубина горных работ, м.

Результаты определения первоначальных напряжений массива горных пород приведены в табл. 1. Следует отметить, что разрезы расположены вкрест простирания рудного тела, поэтому в качестве горизонтальных напряжений принимались поперечные напряжения. Также, несмотря на то, что в окрестности опытного блока действуют напряжения, соответствующие глубине 300–350 м, в окрестности карьера напряжения изменяются с глубиной в соответствии с данными таблицы.

Физико-механические свойства трахидацитов характеризуются следующими основными параметрами: модуль упругости $E = 5{,}43 \cdot 10^4$ МПа; модуль деформации $E_д$ = 10 100 МПа; коэффициент Пуассона μ = 0,24; объемный вес 0,0247 МН/м^3; начальное сцепление 32 МПа; начальный угол внутреннего трения 530; коэффициент крепости по М.М. Протодьяконову 12–14; предел прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$ = -186,9 МПа [4].

Для отбитой руды, замагазинированной в камере, начальный модуль деформации составил E_0 = 50–70 МПа, коэффициент Пуассона μ = 0,27, объемный вес 0,0165 МН/м^3, коэффициент пропорциональности при отношении напряжений K = 7,5 и степень этого отношения b = 0,59 (коэффициенты K и b определены по методике О.В. Зотеева).

Очистная камера моделируемого блока характеризуются следующими размерами: глубина камеры 35 м, ширина камеры 13 м (по 38 разведочной линии); глубина камеры 50 м, ширина камеры 13 м (по 39 разведочной линии).

Допустимые напряжения на сжатие с учетом трещиноватости и блочности горных пород согласно Инструкции РД 06-329-99 составят 0,6 $\sigma_{сж}$, т.е. -112 МПа, а на растяжение равны 18 МПа [5].

Значения первоначальных напряжений массива горных пород

Глубина горных работ, м	Горизонтальные напряжения, МПа	Вертикальные напряжения, МПа
-300	-7,6	-7,4
-600	-15,3	-14,8
-900	-22,9	-22,2
-1200	-30,5	-29,6

Всего промоделировано шесть моделей (по разведочным линиям 38 и 39): борта карьера без влияния подземной камеры, борта карьера с расположенными в днище очистными камерами (открытой и замагазинированной отбитой рудой).

Анализ результатов моделирования позволяет отметить следующее.

Главные напряжения σ_1 в приконтурном массиве карьера имеют сжимающий характер, невелики и вблизи нижних бортов карьера не превышают -(20–26) МПа.

Главные напряжения σ_3 в приконтурном массиве имеют также сжимающий характер, невелики и вблизи подошвы и бортов карьера не превышают значений -11 МПа.

Полные напряжения на контуре карьера изменяются в диапазоне от -(3–7) МПа (на верхних уступах) до -(20–36) МПа (вблизи подошвы карьера).

В целом, значения напряжений не превышают допустимых значений (-112 МПа).

Зона влияния горных работ вблизи бортов нижних уступов и подошвы карьера составляет порядка 7–10 м, глубже этой зоны напряжения близки к первоначальным.

Полные смещения на контуре карьера невелики и составляют 2–6 мм. Деформации изменяются в диапазоне: 0,1–0,9 мм вертикальные и 0,1–1 мм горизонтальные.

При моделировании очистных камер выявлено, что главные напряже-

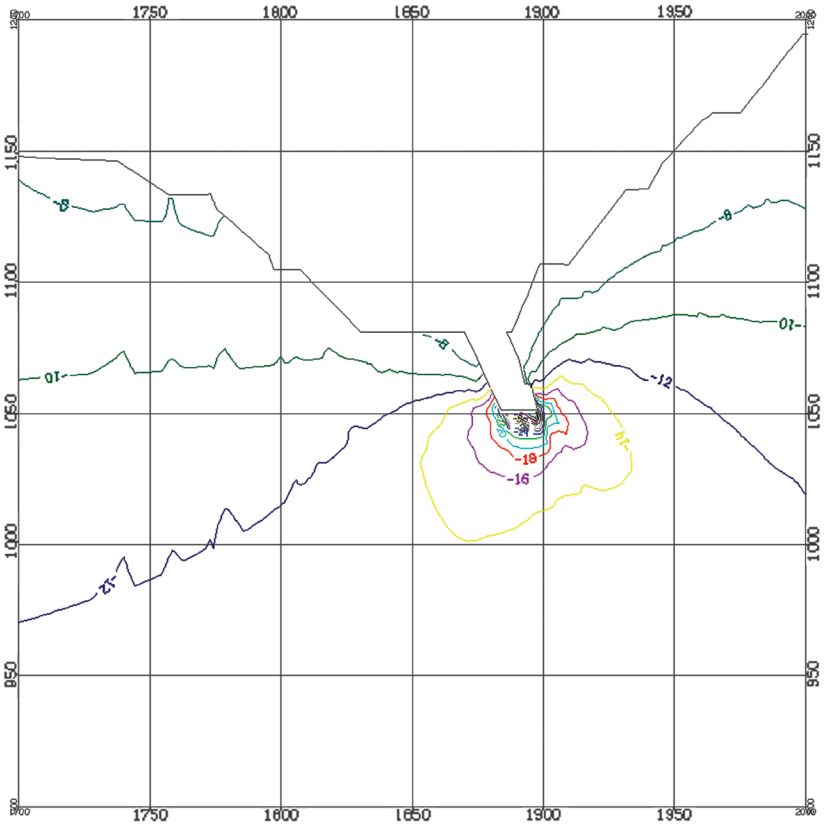

Рис. 2. Максимальные сжимающие напряжения σ_1 вокруг очистной камеры по разведочной линии 38 (диапазон -40 ÷ -5) МПа)

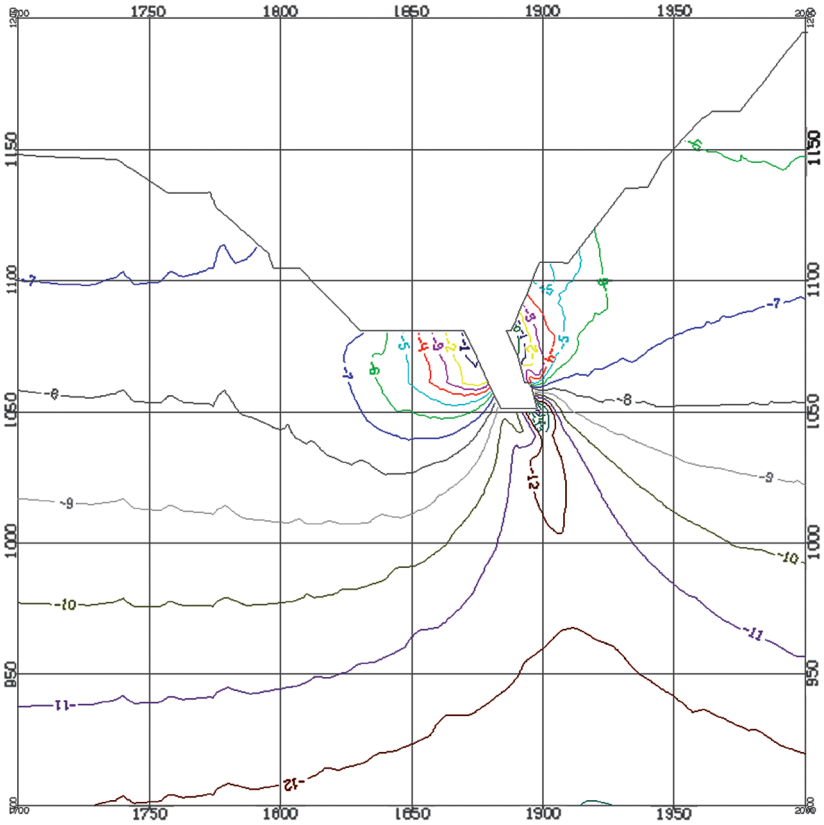

Рис. 3. Минимальные сжимающие напряжения σ_3 вокруг очистной камеры по разведочной линии 38 (-15 ÷ -1 МПа)

ния σ_1 на стенках камеры по характеру сжимающие и не превышают значений -(8–12) МПа (рис. 2).

Главные напряжения σ_3 в стенках очистной камеры, возле нижних уступов и подошвы карьера весьма незначительны, по характеру являются растягивающими и не превышают значений 1–7 МПа (рис. 3). Величина растягивающей зоны не превышает 1–3 м в стенках очистной камеры и в борту уступа карьера.

Полные напряжения (рис. 4) на контуре стенок камеры не превышают значений -(5–8) МПа, в подошве и нижних уступов – -(12–14) МПа.

Таким образом, в стенках очистной камеры, вблизи подошвы карьера и нижних уступов напряжения не превышают допустимых.

Смещения и деформации в массиве горных пород вокруг очистной камеры невелики и не превышают нескольких миллиметров (рис. 5).

В почве камеры главные напряжения σ_1 и σ_3 резко возрастают, по характеру являются сжимающими и достигают значений -(50–70) МПа и выше. Значения эти не превышают прочности на сжатие (-112 МПа), но, возможно, углы в почве камер будут разрушаться. Зона влияния достаточно велика и сопоставима с размерами самой очистной камеры (10–20 м и более). Следует отметить, что с уменьшением глубины очистной камеры и

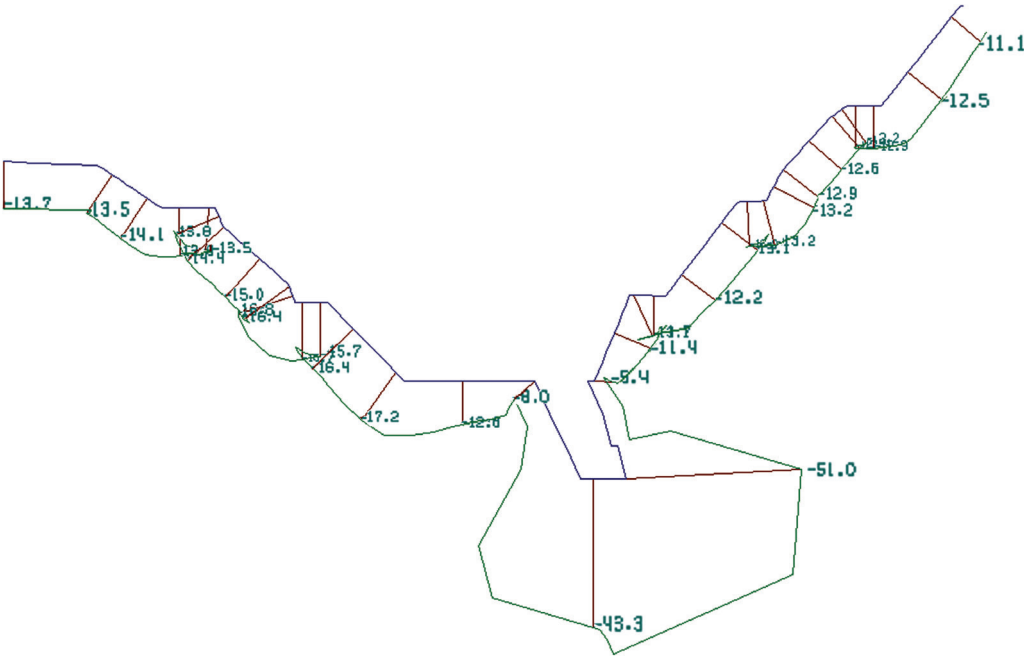

Рис. 4. Полные напряжения на контуре камеры и карьера по разведочной линии 38, МПа (-11 ÷ -51 МПа)

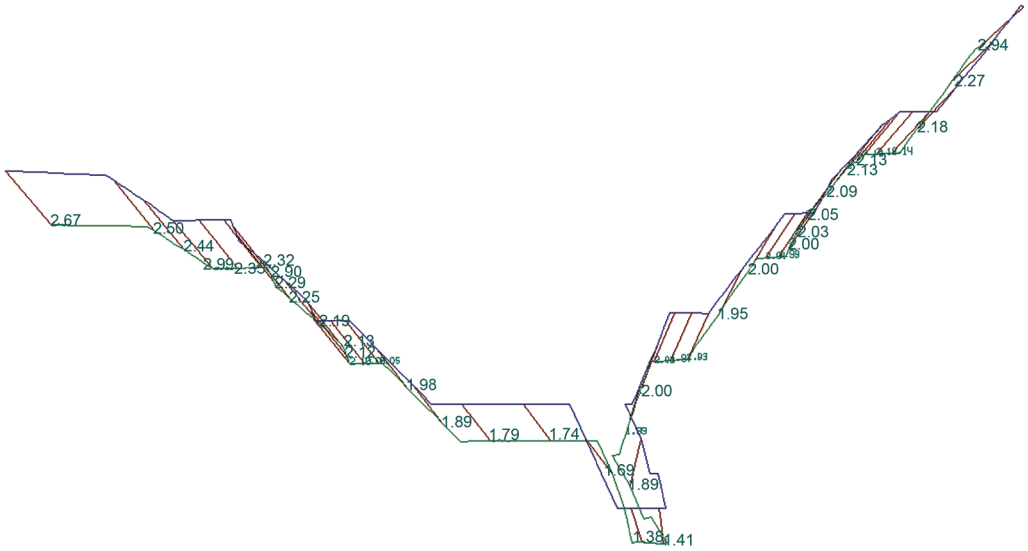

Рис. 5. Полные смещения вокруг очистной камеры по разведочной линии 38, мм (1–3 мм)

увеличением ее ширины, уровень напряжений в почве камеры резко снижается.

При закладке очистных камер отбитой рудой напряжения вокруг камеры уменьшаются, но, в целом, по характеру изменяются незначительно. Напряжения σ_1, по прежнему, сжимающие, достигают максимальных значений -(24–40) МПа только в дне очистной камеры. Напряжения σ_3 в стенках камеры растягивающие, не превышают значений плюс 3–5 МПа, в почве камеры – сжимающие, порядка -(15–17) МПа. Полные напряжения не превышают -(14–20) МПа.

Некоторое повышение смещений и деформаций отмечается в верхней части замагазинированной камеры, возле дна карьера, которые достигают значений до 1 см. Обуславливается это отсутствием барьерного целика между карьером и подземной камерой.

По результатам моделирования сделаны следующие выводы:

1. Борта и дно карьера после отбойки очистной камеры, с последующим магазинированием в ней руды, будут находиться в устойчивом состоянии.

2. В связи с высокими напряжениями в почве камеры на горизонте выпуска необходимо проводить мероприятия по обеспечению устойчивости горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шурыгин С.В., Морозов А.А., Лизункин В.М., Лизункин М.В., Бейдин А.В.* Комплексная технология отработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельные статьи (специальный выпуск). – 2014. – № 12. – С. 16–28.

2. *Зотеев В.Г., Зотеев О.В., Ножин А.Ф.* Метод и программа расчета напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов горных выработок в сплошном и трещиноватом массиве / Численные методы оценки устойчивости подземных сооружений: Сборник научных трудов. – Апатиты: ИГД КФАН, 1988.

3. *Лизункин В.М., Лизункин М.В., Сосновская Е.Л., Бейдин А.В.* Особенности напряженно-деформированного состояния горного массива на Юбилейном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 4. – С. 201–206.

4. *Лизункин В.М., Бейдин А.В. и др.* Отчет о проведении исследовательских испытаний физико-механических свойств горных пород и руд урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. – Чита: ЗабГУ, 2013. – 97 с.

5. *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.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 66 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Лизункин Владимир Михайлович[1] – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: prmpi.zabgu@mail.ru,

Шурыгин Сергей Вячеславович – генеральный директор ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО»), e-mail: ShuriginSV@ppgho.ru,

Лизункин Михаил Владимирович[1] – кандидат технических наук, доцент, e-mail: LMV1972@mail.ru,

Бейдин Алексей Владимирович – старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Лабораторный технологический комплекс геомеханических, физико-технических измерений, геотехнологии и обогащения полезных ископаемых», Забайкальский государственный университет, e-mail: beydin@mail.ru,

[1] Забайкальский государственный университет.

UDC 622.831.312

EVALUATION OF RESISTANCE OF OPEN PIT SIDE AND STRUCTURE BY FINITE-ELEMENT TECHNIQUE AT THE COMPLEX TECHNOLOGY OF MINING POOR-BALANCED URANIUM ORE

Lizunkin V.M.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, *e*-mail: prmpi.zabgu@mail.ru,
Shurygin S.V., General Director, «Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union» JSC,
674673, Krasnokamensk, Russia, *e*-mail: ShuriginSV@ppgho.ru,
Lizunkin M.V.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, *e*-mail: LMV1972@mail.ru,
Beydin A.V., Senior Researcher of Science and Educational Center «Laboratory Technological Complex of Geomechanical, Physical and Technical Measurements, Geotechnology and Minerals Processing»,
Transbaikal State University, 672039, Chita, Russia, *e*-mail: beydin@mail.ru.
[1] Transbaikal State University, 672039, Chita, Russia.

Tukuluevskoe field in the 70–90 years of the last century was developed by surface mining method. Uranium reserves with a low metal content remained under the open-pit bottom, and nowadays mining such deposits by traditional underground physical-technical geotechnologies is unprofitable, as national and international experience has proven.

For modifying pit reserves of the field, the complex technology of poor-balanced ore mining by geotechnological methods, which contains ore shrinkage in the underground stope with the following solvent extraction, is developed. In this case, an important task is Geomechanical ground and evaluation of stability of pit walls and stope, for which the six models at different conditions have been created by the finite element method (real status of the mine, as well as its impact on underground mining of pit reserves by systems of ore shrinkage and open stope).

The basic data for modeling were value of initial tension of the rock mass, physical-technical rock characteristics, geometric state of excavation.The results of modeling proved that pit walls and bottom will be in steady state after the breaking the stope, and due to high voltages in soil of stope, it is necessary to provide measures to ensure the stability of mining at the draw level.

Key words: uranium ores, block situ leaching, stope, mine, stability, finite elements method, modeling, main voltages.

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper also participated associate professor E.L. Sosnovskaya, National Research Irkutsk State Technical University.

This work has been conducted within the integrated high-tech production development project «The integrated geotechnology for low-grade in-place uranium ore» supported by the Russian Federation Government (Ministry of Education and Science of Russia).

REFERENCES

1. Shurygin S.V., Morozov A.A., Lizunkin V.M., Lizunkin M.V., Beidin A.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. Special edition. 2014, no 12, pp. 16–28.

2. Zoteev V.G., Zoteev O.V., Nozhin A.F. *Chislennye metody otsenki ustoichivosti podzemnykh sooruzhenii*: Sbornik nauchnykh trudov (Numerical methods for characterization the stability of underground structures: Collection of scientific papers), Apatity, IGD KFAN, 1988.

3. Lizunkin V.M., Lizunkin M.V., Sosnovskaya E.L., Beidin A.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014, no 4, pp. 201–206.

4. Lizunkin V.M., Beidin A.V. *Otchet o provedenii issledovatel'skikh ispytanii fiziko-mekhanicheskikh svoistv gornykh porod i rud uranovykh mestorozhdenii Strel'tsovskogo rudnogo polya* (Report on the research tests of physical and mechanical properties of rocks and ore deposits of Streltsovsky uranium ore field), Chita, ZabGU, 2013, 97 p.

5. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniyakh, ob"ektakh stroitel'stva podzemnykh sooruzhenii, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (RD 06–329-99)* (Instructions for safe mining operations on ore and nonmetallic deposits of underground construction sites prone and dangerous for rock bumps (RD 06–329-99)), Moscow, *GP NTTs po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii*, 2000, 66 p.