

## ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД

А. Л. Вильмис, С. В. Маркелов, О. А. Луконина, К. С. Некоз

<sup>1</sup> Российский государственный геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), Москва, Россия

**Аннотация:** Изложены основные закономерности изменения производительности блоков подземного выщелачивания. Показано влияние геологических и гидрогеологических параметров на процессы коагуляции и представлены методики получения геотехнологических показателей для проектирования режимов подземного выщелачивания. Приведены результаты опытных исследований по напорно-безнапорному и безнапорному режиму фильтрации в эксплуатационных блоках, отличающихся по физико-химическим и фильтрационным свойствам. Выявлена интенсивность снижения производительности эксплуатационного блока во времени. Проведен анализ зависимости показателя интенсивности снижения производительности блоков от скорости фильтрации растворов в прискважинных зонах. Установлено, что в зависимости от условий фильтрации растворов в рудном пласте различны величины  $K_f$  слабофильтрующих пород, рассчитанные по экспериментальным данным с учетом несовершенства нагнетательного устройства по характеру вскрытия рудного пласта. Показано, что в эксплуатационных блоках выщелачивались рудоносные пласты резко отличающихся фильтрационными и физико-химическими свойствами, применялись безнапорный, напорно-безнапорный, напорный режимы фильтрации. В заключительной части статьи приведены выводы, в которых обобщены результаты опытно-промышленных и лабораторных работ, проведенных авторами. Даны практические рекомендации по повышению эксплуатационной производительности участков и блоков подземного выщелачивания с учетом геотехнологических параметров и конструктивных параметров блоков.

**Ключевые слова:** подземное выщелачивание, геотехнологические, блок ПВ, режим фильтрации, коэффициент фильтрации, нагнетательные и дренажные устройства, коагуляция пород, показатель интенсивности снижения производительности блока, коагуляция, фильтрация растворов.

**Для цитирования:** Вильмис А. Л., Маркелов С. В., Луконина О. А., Некоз К. С. Оценка гидродинамических параметров технологии подземного выщелачивания руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 299–306. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_31\_0\_299.

### Estimate of hydrodynamic parameters of in-situ leaching technology

A. L. Vilmis, S. V. Markelov, O. A. Lukonina, K. S. Nekoz

<sup>1</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

**Abstract:** The article describes the main patterns of variation in production of in-situ leach blocks. The influence of geological and hydrogeological parameters on mudding is shown, and the procedures of obtaining geotechnical parameters for engineering design of in-situ leaching modes are presented. The pilot studies into the forced-and-free flow and free flow seepage in operating blocks with different physicochemical and permeation properties are reported. It is found that rate of decrease in productivity of an operating block increases with time. The productivity decrease rate in blocks is analyzed versus flow rates of solutions in well bore zones. Depending on flow conditions of solutions in ore strata, the values of  $K_p$  in weakly permeable rocks, calculated from experimental data with regard to operational deficiency of pressure systems in ore access, are different. The leach blocks composed of ore strata having contrast physical and mechanical properties and permeability were subjected to free flow, forced-and-free flow and forced flow modes of seepage. The article ends with generalization of data obtained by the authors in pilot studies and laboratory tests. The recommended practices on improvement of working capacities in in-situ leach blocks and sites with regard to geotechnical parameters and design values of the blocks are given.

**Key words:** in-situ leaching, geotechnical parameters, in-situ leach block, flow mode, permeability, pressure and drainage systems, rock mudding, block production capacity decrease rate, solution flow.

**For citation:** Vilmis A. L., Markelov S. V., Lukonina O. A., Nekoz K. S. Estimate of hydrodynamic parameters of in-situ leaching technology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3-1):299–306. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_31\_0\_299.

## Введение

Эффективность технологии подземного выщелачивания (ПВ) зависит от многих факторов. Структурные и текстурные особенности рудного пласта влияют на характер движения растворов и на производительность блоков ПВ.

## Описание метода исследования

1. Зависимость производительности блоков подземного выщелачивания от показателя интенсивности процесса кольтматации.

Опытно-промышленные исследования, проведенные на большом количестве эксплуатационных участков и блоков, выявили, что скорость фильтрации растворов ( $V$ ) при изменении напора нагнетания ( $H$ ) зависит от коэффициента фильтрации и напорного гидравлического градиента:

$$V = K_{\phi} \cdot I^n, \text{ м/сут.} \quad (1)$$

где  $I$  — величина напорного гидравлического градиента;  $n$  — эмпирический

показатель, зависящий от характера движения растворов изменяющийся в пределах 0,5÷1,0 [1, 2, 3, 4, 5].

Для обоснования режима и гидродинамических параметров ПВ из рудоносных пород с различными фильтрационными свойствами с учетом обнаруженных особенностей фильтрации растворов в глинистых породах для получения расчетных уравнений проводились исследования [6, 7, 8]:

- по характеру вскрытия продуктивного пласта оценивалось влияние на производительность несовершенства нагнетательных и дренажных устройств.

- изучалось влияние кольтматации рудного пласта на эффективность подземного выщелачивания в блоках;

- с учетом выявленных особенностей фильтрации продуктивных растворов в сложноструктурных рудных блоках [9] для определения гидродинамических параметров ПВ устанавливались расчетные уравнения.

Выявлено аналитическое уравнение, определяющее производительность блоков ПВ и зависящее от фильтрационной неоднородности выщелачиваемого массива, а также от несовершенства нагнетательных и дренажных устройств:

$$Q_{\text{нагн}} = K_{\phi} \cdot \left( \frac{H - m / 2}{L} \right) \cdot F_{\delta} \cdot \sqrt{F_p / F_{\delta}}, \text{ м}^3 \quad (2)$$

где  $H$  — напор в нагнетательной скважине, м;  $m$  — мощность фильтрующего пласта, м;  $L$  — длина пути фильтрации, м;  $F_{\delta}$  — расчетная боковая поверхность приемного (нагнетательного) устройства, м<sup>2</sup>;  $F_p$  — рабочая суммарная площадь нагнетательного устройства, м<sup>2</sup>;

Формула действительна для условий слоистой неоднородной по текстурным и фильтрационным свойствам толщи [2, 4].

Нами предложено уравнение по определению раствороприемности нагнетательных устройств при условии, что фильтрационные свойства рудного пласта одинаковы по всем направлениям (как вдоль, так и в направлении нормальном пластованию):

$$Q_{\text{нагн}} = K_{\phi} \cdot \left( \frac{H - m}{L} \right)^2 \cdot F_{\delta}, \quad (3)$$

В зависимости от условий фильтрации растворов в рудном пласте установлены величины  $K_{\phi}$  слабофильтрующих пород, рассчитанные по уравнению (1) с учетом несовершенства нагнетательного устройства по характеру вскрытия рудного пласта. В эксплуатационных блоках выщелачивались рудоносные пласты резко отличающихся фильтрационными и физико-химическими свойствами [10, 11, 12, 13], применялись безнапорный, напорно-безнапорный, напорный режимы фильтрации. В эксплуатационные блоки подавались одинаковые по химическому составу сернокислотные рабочие рас-

творы, содержащие пелитовые частицы в количестве от 10 до 70 мг/л.

Графические зависимости уменьшения производительности каждого эксплуатационного блока ПВ по растворам ( $Q$ ) во времени ( $t$ ) для действующих напоров ( $H$ ) (рис. 1) свидетельствуют, что зависимость  $Q = f(t, H)$  достаточно хорошо согласуется с эмпирической формулой [2, 4]:

$$Q_t = \frac{Q_H}{1 + K_3 \sqrt{\frac{t}{H}}}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (4)$$

где  $K_3$  — эмпирический показатель, характеризующий интенсивность снижения производительности каждого блока во времени при соответствующем напоре нагнетания, изменяющийся от 0,007 до 3,2.

Расчетные значения эмпирических показателей ( $K_3$ ) вне зависимости от величины напора  $H$  для каждого блока ПВ идентичны.

Исходя из вышеприведенных доводов можно сделать вывод о том, что производительность выщелачиваемого блока снижается во времени за счет сложного процесса взаимодействия выщелачивающих растворов с рудной толщей и изменений фильтрационных свойств горной массы, и является только ему присущим показателем.

2. Влияние конструктивных элементов нагнетательных и дренажных устройств на характер фильтрации растворов.

Эксплуатационная производительность в блоках при ПВ снижается в течение всего периода эксплуатации. Значительное снижение эксплуатационной производительности блоков при выщелачивании происходит в первый месяц и интенсивно снижается в первую декаду их эксплуатации. Геометрические параметры блоков, его фильтрационные свойства, а также кон-

структивное выполнение нагнетательных устройств влияет на временной отрезок полного насыщения рудных пород блока и продолжается в течение 11 – 25 суток и более (рис. 1).

Фильтрационные и физические свойства блоков ПВ за достаточно большие промежутки времени значительно изменяются.

Для технологических расчетов параметров блоков ПВ необходимо установить переменную величину – коэффициент фильтрации рудоносных пород, который, по нашему мнению, является одним из важнейших геотехнологических параметров.

Во время эксплуатации блоков ПВ их фильтрационные свойства посто-

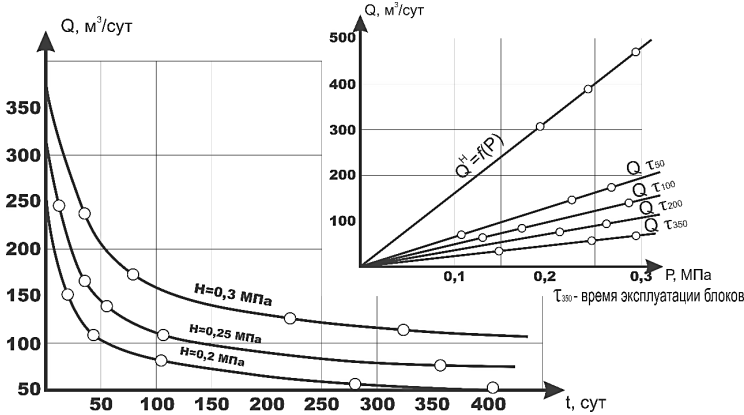


Рис. 1. Снижение производительности блоков ПВ во времени  
Fig. 1. Decrease in the performance of PV blocks over time

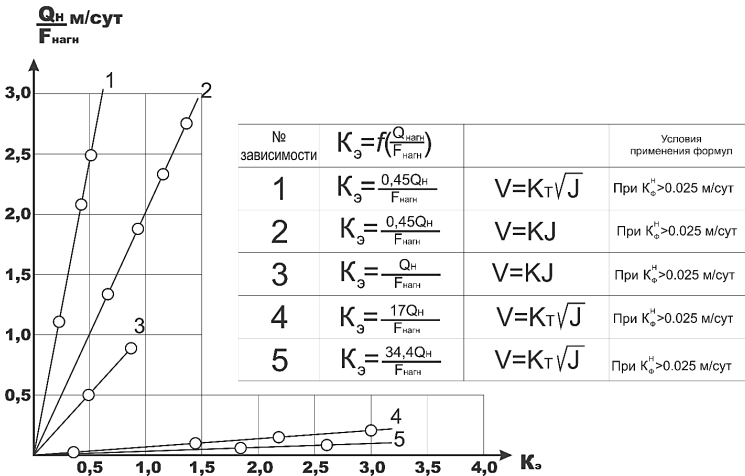


Рис.2. Зависимости  $K_g = f\left(\frac{Q_{нагн}}{F_{нагн}}\right)$  для блоков ПВ с различными свойствами

Fig. 2. Dependencies  $K_g = f\left(\frac{Q_{нагн}}{F_{нагн}}\right)$  for PV blocks with different properties.

янно изменяются, и для практических расчетов технологических параметров выщелачивания необходимо спрогнозировать, по какой закономерности происходит это изменение.

Эти закономерности были определены для достаточно большого числа блоков на основе анализа графической зависимости  $Q = f(t)$ , с помощью чего нами определены начальные производительности блоков ( $Q_H$ ) при разных напорах нагнетания выщелачивающих растворов [2, 4].

Все блоки разделены на пять групп (рис. 2, 3) в зависимости от показателя  $K_{\Sigma}$  и скорости фильтрации растворов в зонах нагнетания скважин.

Для каждой группы блоков ПВ установлено, что показатель  $K_{\Sigma}$  достаточно хорошо коррелируется с начальной скоростью фильтрации растворов в при-скважинной зоне нагнетания:

$$V_H = \frac{Q_H}{F_{\text{нагн}}}, \quad (5)$$

и определяется уравнением:

$$K_{\Sigma} = K_{V_n} \frac{Q_H}{F_{\text{нагн}}}, \quad (6)$$

где  $K_{V_n}$  – обобщенный эмпирический коэффициент.

Установлено, что для рудоносных пород с начальным значением  $K_{\phi}(K_{\phi}^H)$  более 0,025 м/сут,  $K_{V_n} = 0,45$  для всей группы блоков ПВ, независимо от конструкций нагнетательных и дренажных устройств, напорной или безнапорной фильтрации вдоль и нормально напластованию рудоносных пород, в которых  $Q_{\Delta t} = f(H^{n=1,0})$  [2, 4].

$K_{V_n} = 0,187$  для всей группы блоков  $K_{\phi}^H > 0,025$  м/сут, в которых  $Q_{\Delta t} = f(H^{n=0,5})$ .

Для рудоносных пород с начальным значением  $K_{\phi}$  меньше 0,025 м/сут, но не

более 0,0055 м/сут:  $K_{V_n} = 1,0$  для группы блоков, в которых  $Q_{\Delta t} = f(H^{n=1,0})$ ;  $K_{V_n} = 17,0$ , в которых  $Q_{\Delta t} = f(H^{n=0,5})$ .

Для глинистых рудоносных пород с  $K_{\phi}^H > 0,005$  м/сут –  $K_{V_n} = 34,4$  для группы блоков ПВ со скважинами, в которых  $Q_{\Delta t} = f(H^{n=0,5})$ .

Функция  $K_{\Sigma}$  в зависимости от скорости фильтрации растворов в зоне нагнетания является прямо пропорциональной, что подтвердили экспериментальные работы, проведенные в 50 блоках ПВ, в которых проводилось выщелачивание фильтрационным потоком вне зависимости от особенности систем дренажа и нагнетания.

Величина коэффициента  $K_{\Sigma}$  изменяется лишь в формуле (6), что обусловлено различными литологическими характеристиками руд, а также турбулентным или ламинарным характером движения выщелачивающего раствора и их начальным коэффициентом фильтрации.

При ламинарном характере фильтрации растворов в блоках ПВ с  $K_{\phi}^H < 0,025$  м/сут,  $K_{V_n} = 1$ , а величина  $K_{\Sigma}$  численно равна скорости движения растворов в зоне нагнетания. Для пород с  $K_{\phi}^H > 0,025$  возникающая турбулентность при движении потока в массиве снижает величину [2, 4]  $K_{\Sigma}$ .

## Выводы

1. Анализ результатов исследования показывает, что меньшие величины начального значения  $K_{\phi}$  в блоках ПВ соответствуют более высоким значениям показателя в формуле (6).

2. При турбулентном режиме фильтрации растворов выщелачивания

зависимости  $K_{\Sigma} = f\left(\frac{Q_H}{F_{\text{нагн}}}\right)$  различны.

При ламинарном режиме фильтра-

ции  $K_{\Sigma} = f\left(\frac{Q_H}{F_{\text{нагн}}}\right)$  будет одинаковым

для пород морских и континентальных месторождений.

3. Оценивая технологические показатели параметров выщелачивания с учетом конструктивных параметров блоков, средних начальных величин  $K_{\phi}$  руд, а также режима фильтрации (ламинарного или турбулентного) в блоке представляется возможным рассчитать производительность нагнетательных скважин эксплуатационных блоков и спрогнозировать ее изменение на любой срок их эксплуатации.

4. Во всех исследуемых блоках ПВ эмпирический коэффициент

снижения производительности ( $K_{\Sigma}$ ) прямо пропорционален скорости нагнетания. Такая же зависимость  $K_{\Sigma}$  от скорости фильтрации в зоне дренажа имеет место только для пород с  $K_{\phi}^H < 0,025$  м/сут, причем только в блоках ПВ со скважинными нагнетательными и дренажными устройствами с равными по площади вскрытия рудоносных пород, т.е. при условии  $F_{\text{нагн}} = F_{\text{дрен}}$ . В остальных блоках ПВ значение  $K_{\Sigma}$  с увеличением скорости фильтрации в зоне дренажа уменьшается, причем не линейно, а гиперболически.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голик В. И., Лукьянов В. Г., Страданченко С. Г., Масленников С. А.* Экспериментальное обоснование параметров подземного выщелачивания металлов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 11. С. 90–97.

2. *Маркелов С. В., Аликулов Ш. Ш., Нарзиев А. С.* Кольматация пород продуктивного горизонта при подземном выщелачивании урана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 3. С. 239–241.

3. *Sadykov M. P.* Development and evaluation of a mathematical model in an in-situ uranium leaching technique // Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy Volume 128, Issue 4, 2 October 2019, Pages 158–166

4. *Малухин Н. Г., Маркелов С. В., Баймуразаев Х. Р.* Особенности фильтрации выщелачивающих растворов при доработке уранового месторождения. // Горный вестник Узбекистана. №4, 2013. С. 6–11.

5. *Ghaderi A., Taheri-Shakib J., Sharif Nik M. A.* The distinct element method (DEM) and the extended finite element method (XFEM) application for analysis of interaction between hydraulic and natural fractures // (2018) Journal of Petroleum Science and Engineering, 171, pp. 422–430

6. *Малухин Н. Г., Маркелов С. В., Аликулов Ш. Ш., Казаков Т. А., Нарзиев А. С.* Обоснование рациональной области применения технологии подземного выщелачивания глинистых урановых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 10. С. 91–94.

7. *Аренс В. Ж.* Физико-химическая геотехнология –М.: МГГУ, 2001.

8. *Лавров А. Ю.* Научное обоснование технологий разработки рудных месторождений на основе использования процессов фотоэлектрохимической активации минеральной среды и технологических растворов // автореферат диссертации доктора технических наук / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т. Чита, 2017


9. *Wang P., Sun, Z., Hu Y., Cheng H.* Eaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact // Science of the Total Environment Volume 695, 10 December 2019, Номер статьи 133893

10. *Аликулов Ш. Ш., Маркелов С. В., Халимов И. У., Баймуразаев Х. Р., Казаков Т. А.* Влияние химической кольматации порово-трещинного массива на производительность

блоков подземного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 6. С. 89–91.

11. Сабирова Л. Б. Моделирование процессов диффузионного растворения и фильтрационного переноса металлов для усложненных условий залегания пластов // Наука и новые технологии. 2015. № 1. С. 70–74.

12. Седов Н. П. Особенности движения технологических растворов и подземных вод в рудном массиве при отработке месторождения способом скважинного подземного выщелачивания // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 2. С. 121–124.

13. Петренко Б. Ю., Кеслер А. Г., Носков М. Д., Андреев В. А., Макашеев Ю. Н. Математическое моделирование подземного выщелачивания редкоземельных металлов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 12–3. С. 104–107. 

## REFERENCES

1. Golik V. I., Luk'yanov V. G., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Experimental substantiation of the parameters of underground metal leaching. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2015. Vol. 326. no. 11. pp. 90–97. [In Russ]

2. Markelov S. V., Alikulov Sh. Sh., Narziev A. S. Colmatation of rocks of the productive horizon during underground leaching of uranium. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011. no. 3. pp. 239–241. [In Russ]

3. Sadykov M. P. Development and evaluation of a mathematical model in an in-situ uranium leaching technique. *Applied Earth Science: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy* Volume 128, Issue 4, 2 October 2019, pp. 158–166.

4. Maluhin N. G., Markelov S. V., Bajmurzaev H. R. Features of filtration of leaching solutions during the completion of a uranium deposit. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. no.4, 2013. pp. 6–11. [In Russ]

5. Ghaderi A., Taheri-Shakib J., Sharif Nik M. A. The distinct element method (DEM) and the extended finite element method (XFEM) application for analysis of interaction between hydraulic and natural fractures. (2018) *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, pp. 422–430.

6. Maluhin N. G., Markelov S. V., Alikulov Sh. Sh., Kazakov T. A., Narziev A. S. Justification of the rational application of the technology of underground leaching of clay uranium ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011. no. 10. pp. 91–94. [In Russ]

7. Arens V. Zh. *Fiziko-himicheskaya geotekhnologiya* [Physico-chemical geotechnologies]. Moscow: MGGU, 2001. [In Russ]

8. Lavrov A. Yu. *Nauchnoe obosnovanie tekhnologij razrabotki rudnyh mestorozhdenij na osnove ispol'zovaniya processov fotoelektrohimicheskoy aktivacii mineral'noj sredy i tekhnologicheskikh rastvorov* [Scientific substantiation of technologies for the development of ore deposits based on the use of photoelectrochemical activation of mineral media and technological solutions]. Avtoreferat dissertacii doktora tekhnicheskikh nauk. Irkut. nac. issled. tekhn. un-t. Chita, 2017 [In Russ]

9. Wang P., Sun, Z., Hu Y., Cheng H. Eaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment* Volume 695, 10 December 2019, Nomer stat'i 133893.

10. Alikulov Sh. Sh., Markelov S. V., Halimov I. U., Bajmurzaev H. R., Kazakov T. A. Effect of chemical colmatation of a pore-crack massif on the productivity of underground leaching blocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011. no. 6. pp. 89–91. [In Russ]

11. Sabirova L. B. Modeling of the processes of diffusion dissolution and filtration transfer of metals for complicated reservoir conditions. *Nauka i novye tekhnologii*. 2015. no. 1. pp. 70–74. [In Russ]
12. Sedov N. P. Features of the movement of technological solutions and underground water in the ore mass during the development of the deposit by the method of borehole underground leaching. *Gornyj zhurnal*. 2016. no. 2. pp. 121–124. [In Russ]
13. Petrenko B. Yu., Kesler A. G., Noskov M. D., Andreev V. A., Makaseev Yu. N. Mathematical modeling of underground leaching of rare earth metals. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2015. Vol. 58. no. 12–3. pp. 104–107. [In Russ]

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Вильмис Александр Леонидович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, заведующий кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства;

*Маркелов Сергей Владимирович*<sup>1</sup> — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства;

*Луколина Ольга Александровна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства;

*Некоз Ксения Сергеевна*<sup>1</sup> — аспирант кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства;

<sup>1</sup> Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Vilmis A. L.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), associate Professor of department geotechnological methods and physical processes of mining operations;

*Markelov S. V.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of department geotechnological methods and physical processes of mining operations;

*Lukonina O. A.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, associate professor of department geotechnological methods and physical processes of mining operations;

*Nekoz K. S.*<sup>1</sup>, post-graduate student of department geotechnological methods and physical processes of mining operations;

<sup>1</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Получена редакцией 12.01.2021; получена после рецензии 04.02.2021; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 12.01.2021; received after the review 04.02.2021; accepted for printing 10.02.2021.

