

УДК 622.272(571.56)

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПОДУШКИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ РУДЫ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ



Б. Н. ЗАРОВНЯЕВ,
директор Горного института,
д-р техн. наук,
mine_academy@mail.ru



Г. В. ШУБИН,
зав. кафедрой,
канд. техн. наук

Северо-Восточный федеральный университет
им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия



А. С. КУРИЛКО,
зам. директора
по научной работе,
д-р техн. наук



Ю. А. ХОХОЛОВ,
ведущий научный
сотрудник

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского
СО РАН, Якутск, Россия

Введение

Основной тенденцией ближайших десятилетий как на отечественных, так и зарубежных кимберлитовых карьерах является достижение ими предельных глубин отработки открытым способом и переход на подземный способ добычи руды. Для защиты шахты воздушного и геомеханического влияния остаточной карьерной выемки в технологическую схему вводится специальный конструктивный элемент — предохранительная рудопородная подушка, которая при системе с обрушением постепенно опускается вслед за отработкой верхних горизонтов подземного рудника. В процессе эксплуатации подушка подвергается воздействию различных факторов: сверху со стороны выработанного пространства карьера (низкие температуры и снег зимой, дожди летом, приток минерализованных растворов — круглый год) и снизу, со стороны рудника (влажный шахтный воздух). В результате в теле подушки происходят сложные теплофизические процессы, которые нуждаются в тщательном изучении, чтобы избежать полного его промерзания и потери необходимой сыпучести (подвижности).

Приведены результаты прогнозных расчетов процесса льдонакопления в предохранительной подушке под воздействием на нее природных и техногенных факторов.

Ключевые слова: отбитая руда, предохранительная подушка, температурный режим, фильтрация, вода, пар, лед, конденсация, замерзание, криолитозона.

DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.09.06

Объект, методика и результаты исследования

Трубка «Удачная» — крупнейшее по объемам сырья и размерам рудного тела месторождение алмазов в России. Она расположена в Далдыно-Алаkitском алмазоносном районе, в зоне распространения многолетних мерзлых пород и суровых климатических условий. Глубина нулевой изотермы в окрестностях месторождения варьируется от 700 до 1050 м. Температура пород трубки на глубине нулевых годовых амплитуд не превышает $-4,5$ °С. Среднегодовая температура воздуха в г. Удачном $-13,3$ °С. Абсолютный максимум температуры $+33,5$ °С, абсолютный минимум $-56,1$ °С. Количество атмосферных осадков 253,4 мм [1, 2].

Открытая разработка месторождения, начатая в 1971 г., закончилась в 2014 г., в том же году начал действовать подземный рудник. Для отработки подкарьерных запасов трубки «Удачная» принята система этажного принудительного обрушения под подвижной рудной предохранительной подушкой (рис. 1) [3, 4]. Последняя защищает горнорабочих и технику от пород, осыпавшихся с бортов карьера, и изолирует рудник от внешней атмосферы. С другой стороны, атмосферные осадки и притоки минерализованных подземных вод должны фильтроваться через подушку, а не накапливаться на ней. Для эффективного и безопасного выпуска руды из отбитых блоков породы предохранительной подушки должны оставаться сыпучими.

С учетом отрицательной температуры пород и низкой среднегодовой температуры воздуха нельзя исключить возможность повторного смерзания отбитой руды, как это неоднократно наблюдалось в блоках, выпускных устройствах и рудоспусках на рудниках России и Канады [5].

Подземные воды трубки «Удачная» представлены рассолами, содержащими 300–400 г/л солей [1–3]. Поэтому руда и вмещающие породы засолены и не склонны к смерзанию. В настоящее время напорные воды изливаются на дно карьера в объемах порядка 100–260 м³/ч; в дальнейшем при подземной добыче эти рассолы будут смачивать материал подвижной подушки по всему

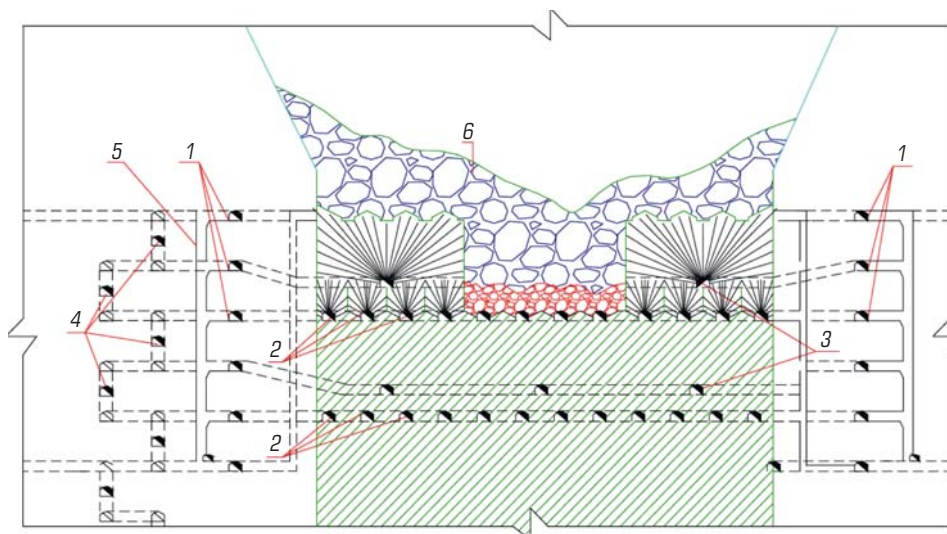


Рис. 1. Вариант системы принудительного обрушения и выемки руды под подвижной предохранительной подушкой:

1 — кольцевые подэтажные выработки; 2 — буровыпускные штреки (орты); 3 — буровой орт (штрек); 4 — спиральный съезд; 5 — рудоспуск; 6 — подвижная предохранительная подушка

периметру карьера. Руда и вмещающая порода, оказавшиеся в центральной части подушки, будут промываться атмосферными осадками и терять свою засоленность. Как показали наблюдения с 2012 по 2014 г. за специально выложенными кучами руды и

породы из материала подвижной подушки, под воздействием атмосферных осадков степень засоленности их за три года уменьшилась в пять раз (с 1,5 до 0,3 %).

Незасоленные и слабозасоленные породы подушки при низких отрицательных температурах будут смерзаться, что может привести к потере сыпучести и осложнит выпуск руды из блока. При большом льдонасыщении упадет водопропускная способность материала подвижной подушки и, соответственно, на дне карьера будут скапливаться атмосферные осадки, что чревато неуправляемому прорыву воды в рудник.

Чтобы не допустить аварийной ситуации на руднике надо грамотно управлять процессом выпуска руды, контролировать толщину подушки, вовремя «шевелить» ее, чтобы не допускать образования больших площадей смерзшегося материала.

Для прогноза температурно-влажностного и мерзлотного состояния предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов руды месторождений криолитозоны авторами статьи разработана математическая модель, которая одновременно учитывает возможность замерзания фильтрующихся через материал подушки атмосферных осадков и талых весенних вод, а также конденсацию и замерзание влаги при движении теплого рудничного воздуха через слой мерзлых пород.

В литературе предложено несколько моделей для расчета температурных условий в мерзлых почвах, которые учитывают пленочное течение влаги [6], фильтрацию воды и диффузии пара [6–9]. В работе [10] учитывается растворение порового льда фильтрующимся рассолом, что приводит к изменению объема массива и понижению его температуры. Все эти модели решают фильтрационную задачу, когда температура флюида и твердого каркаса почвы одинаковая. В случае песчаной или другой мелкодисперсной почвы это допущение вполне оправданно. В нашем же случае отбитая горная порода состоит из достаточно крупных кусков. Поэтому при выводе уравнений, определяющих процессы тепло- и массообмена, отбитую руду можно рассматривать как систему, состоящую из полых цилиндров. Параметры системы рассчитаны с использованием зависимостей [11–15]. Ниже приводятся отдельные результаты расчетов температурно-влаж-

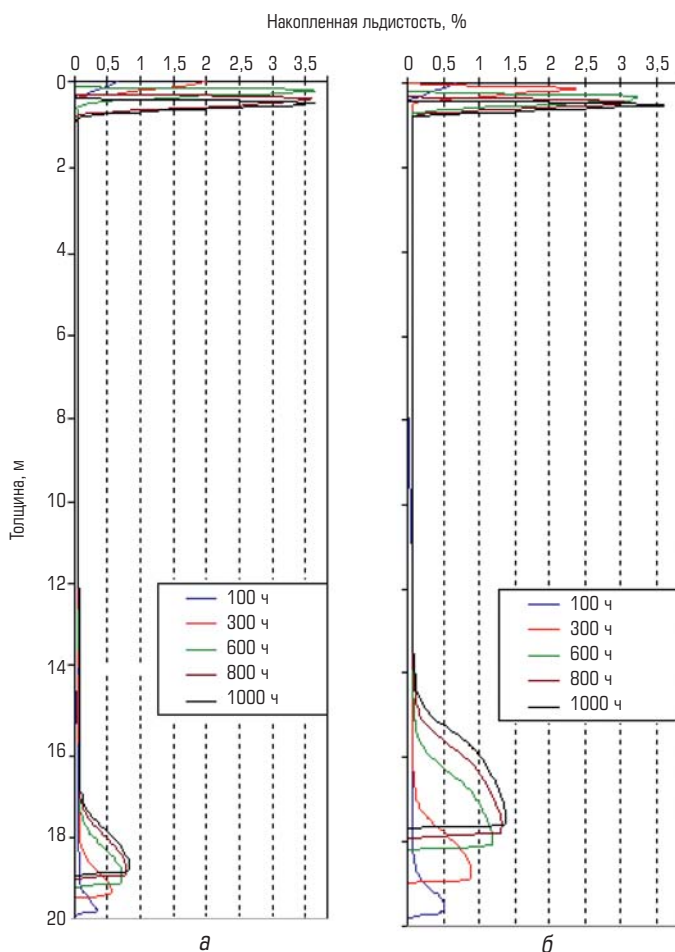


Рис. 2. Динамика льдонакопления в предохранительной подушке при диаметре куска 0,15 м:
а — $h = 100$ Па; б — $h = 300$ Па

ностного состояния предохранительной подушки по комплексной модели,

В качестве примера показан процесс льдонакопления в породах защитной подушки при следующих исходных данных: удельная теплоемкость скелета породы 900 Дж/(кг·К); плотность породы 2500 кг/м³; коэффициент теплопроводности мерзлой породы 2,1 Вт/(м·К); коэффициент теплопроводности талой породы 1,8 Вт/(м·К); толщина подушки 20 м; пустотность пород 15 %; температура рудничного воздуха +2 °С; относительная влажность рудничного воздуха 100 %; начальная температура породы -4 °С; начальная (внутренняя) влажность породы 0,08 доли ед. Температуру наружного воздуха на дне карьера учитывали по метеоданным г. Удачного. Плотность потока воды со дна карьера в предохранительную подушку рассчитывали из условия таяния накопившегося снега и поступления дождевых осадков. Начало счета совпадает с переходом температуры наружного воздуха в плюсовые значения. Было изучено влияние размера (диаметра) кусков породы подушки на динамику льдонакопления в ней при значениях депрессии h (100 и 300 Па).

Сначала были приняты куски со средним диаметром 0,15 м (рис. 2). Как видно, при поступлении воды в предохранительную подушку происходит постепенное намораживание льда на внутренней ее поверхности за счет холода, аккумулированного мерзлыми породами подушки. Характерный «горб» постепенно сдвигается вниз по мере оттаивания смерзшихся кусков породы в верхней части подушки за счет теплообмена с летним теплым атмосферным воздухом. В нижней части подушки также происходит накопление льда за счет конденсации влаги из влажного рудничного воздуха и замерзания конденсата на поверхности кусков пород. Кривая льдосодержания также имеет характерный «горб», который с течением времени перемещается к верхней границе подушки. Из рис. 2 также видно, что повышение депрессии воздушного потока приводит к тому, что зона льдонакопления сдвигается вглубь и чем она выше, тем интенсивнее процесс льдонакопления. При этом интенсивность льдонакопления в верхней части подушки в 2–3 раза выше, чем в нижней части, поскольку объем поступления влаги за счет атмосферных осадков намного превышает объемы поступления влаги за счет конденсации из рудничного воздуха. Отдельные куски породы в зонах интенсивного льдонакопления могут смерзнуться, опасность их смерзания повышается по мере накопления льда в пустотах между ними.

Процесс льдонакопления в предохранительной подушке несколько меняется при увеличении диаметра куски до 0,2 м (рис. 3). В этом случае зоны интенсивного льдонакопления находятся на более значительном расстоянии как с поверхности, так и с нижней границы подушки. Также при этом варианте видно, что в верхней части подушки зона интенсивного льдонакопления при $h = 100$ Па находится глубже по сравнению с депрессией $h = 300$ Па. Это объясняется тем, что при повышении депрессии увеличивается скорость фильтрации воздуха снизу вверх, и тем самым большее количество холода поступает из нижних слоев

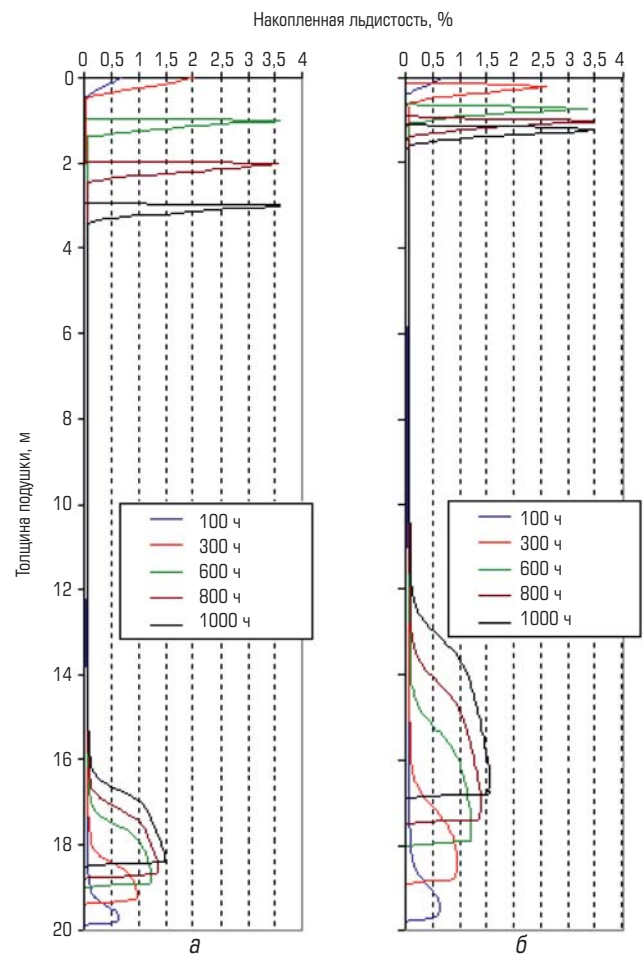


Рис. 3. Динамика льдонакопления в предохранительной подушке при диаметре куски 0,2 м:

а — $h = 100$ Па; б — $h = 300$ Па


мерзлой подушки, что замедляет процесс протаивания с земной поверхности.

Заключение

Разработана математическая модель тепломассообмена рудничного воздуха и воды, фильтрующейся с поверхности, с отбитой мерзлой рудой предохранительной подушки. Модель позволяет рассчитать образование льда в пустотах материала подушки и отбитой руды в блоке за счет фильтрации воды и конденсации влаги в зависимости от температуры, теплофизических свойств, гранулометрического состава, слоистости, пустотности отбитой руды, температуры и влажности шахтного и наружного воздуха, депрессии.

Результаты расчета позволяют спрогнозировать возможность смерзания отбитой руды, что необходимо для обоснования рациональной технологии ее выпуска из очистных блоков рудника при отработке подкарьерных запасов месторождений криолитозоны.

Библиографический список

1. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. — Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. — 568 с.
2. Дроздов А. В. Природные и техногенные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы). — Якутск: ИПК СВФУ, 2011. — 416 с.
3. Глаголев П. М., Савич И. Н. Технологии отработки подкарьерных запасов трубки «Удачная» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 12. С. 281–284.
4. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Кульминский А. С. Отработка подкарьерных запасов трубки «Удачная» в сложных климатических, горно- и гидрогеологических условиях // Горный журнал, 2011. № 1. С. 63–66.
5. Иванов Ю. Н. Смерзаемость горной массы в капитальных рудоспусках // Проблемы смерзания и липкости минерального сырья в процессе его добычи, транспортировке и переработки: матер. постоянно действующего Российского заочного семинара. — Якутск: ЯИЦ СО РАН, 1994. Вып. 1. С. 64–65.
6. Hansson K., Simunek J., Mizoguchi M., Lundin L.-C., van Genuchten M. Th. Water flow and Heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications // Vadose zone J. 2003. Vol. 3. P. 693–704.
7. Karra S., Painter S. L., Lichtner P. C. Three-phase numerical model for subsurface hydrology in permafrost-affected regions (PFLOTRAN-ICEv1.0). The Cryosphere, 8, 1935–1950, 2014. doi: 10.5194/tc-8-1935-2014
8. Painter S. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: model formulation, validation, and applications // Computational Geosciences. 2011. Vol. 15(1). P. 69–85.
9. Zhou Y., Zhou G. Numerical simulation of coupled heat-fluid transport in freezing soils using finite volume method // Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 46. P. 989–998.
10. Попов В. И. Математическое моделирование процесса инфильтрации высокоминерализованного раствора в мерзлый массив // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: матер. XXI Совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. — Якутск, 2015. С. 144–146.
11. Вахромеев И. И. Теоретические основы тампонажа горных пород. — М.: Недра, 1968. — 291 с.
12. Каймонов М. В., Хохолов Ю. А. Математическое моделирование температурно-влажностного режима блока отбитой руды рудников Севера // Наука и образование. 2010. № 1. С. 27–32.
13. Хохолов Ю. А., Курилко А. С., Каймонов М. В., Шубин Г. В. Моделирование термического состояния предохранительной подушки на руднике «Удачный» // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России: тр. Всерос. науч.-практ. конф. — Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2011. С. 273–277.
14. Кутепов А. М., Полянин А. Д., Запryanov З. Д., Вязьмин А. В., Казенин Д. А. Химическая гидродинамика: справочное пособие. — М.: Квантум, 1996. — 336 с.
15. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с. 

«GORNYI ZHURNAL» / «MINING JOURNAL», 2016, № 9, pp. 33–36
DOI:dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.09.06

Temperature and moisture content forecast for safety cushion in ore extraction below pit bottom in permafrost

Information about authors

B. N. Zarovnyaev¹, Director of Mining Institute, Doctor of Engineering Sciences, mine_academy@mail.ru
G. V. Shubin¹, Head of a Chair, Candidate of Engineering Sciences
A. S. Kurilko², Deputy Director of Scientific Work, Doctor of Engineering Sciences
Yu. A. Khokholov², Leading Researcher

¹ Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

² Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract

Majority of Russian and foreign open pit mines will reach ultimate depth and will transit to mining with underground methods in the nearest decades. To protect underground mines from aerodynamic and geomechanical disturbance from the side of an open pit, the structure of underground mining flow charts is introduced with a special element — safety ore-and-rock cushion that is to subside gradually, next to ore extraction from upper levels of underground mines using systems with caving. While in service, the cushion is subjected to various effects from above, from the side of an open pit void (low temperature and snow in winter, raining in summer, saline inflows the year round) and from below, from the side of an underground mine (moist mine air). As a consequence, complex thermal processes run in the body of the cushion; and it is required to study comprehensively these processes to avoid complete adfreezing of the cushion and loss of required flowability (mobility).

A mathematical model is developed to forecast temperature and moisture content of safety cushion during ore extraction in pit bottom under conditions of permafrost. The model takes into account initial temperature and moisture content of rocks, grain composition, stratification, porosity of broken ore, temperature and moisture content of mine and open air, depression.

The authors report the forecast results for temperature and moisture content of safety cushion. It is shown that ice accretion rate under seepage of atmospheric precipitation and snowmelt is 2–3 times higher at the top of the cushion than at its bottom. The forecast results allow predicting potential adfreezing of broken ore and, thus, decision-making on rational conditions of ore discharge.

Keywords: broken ore, safety cushion, temperature conditions, seepage, water, vapor, ice, condensation, freezing, permafrost.

References

1. Kolganov V. F., Akishev A. N., Drozdov A. V. Mining-geological peculiarities of primary deposits of Yakutia diamonds. Mirnyy: Mirnyy State Printing House, 2013. 568 p.

2. Drozdov A. V. Natural and technogenic reservoirs of industrial effluents in cryolitic zone (on example of Yakutia part of Siberian platform). Yakutsk: Institute of Further Training of the North-Eastern Federal University, 2011. 416 p.
3. Glagolev P. M., Savich I. N. Technologies of mining of pit reserves of “Udachnaya” pipe. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2007. No. 12. pp. 281–284.
4. Sokolov I. V., Sмирнов А. А., Антипин Ю. Г., Кульминский А. С. Processing of pit reserves of Udachnaya pipe in complex climatic, mining- and hydrogeological conditions. *Gornyy Zhurnal*. 2011. No. 1. pp. 63–66.
5. Ivanov Yu. N. Freezability of rock mass in capital bing holes. *Problems of freezing and stickiness of mineral raw materials during its extraction, transportation and processing: materials of the constant Russian extra-mural seminar*. Yakutsk: Yakutia Science Center of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 1994. Iss. 1. pp. 64–65.
6. Hansson K., Simunek J., Mizoguchi M., Lundin L.-C., Van Genuchten M. Th. Water flow and Heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications. *Vadose zone J*. 2003. Vol. 3. pp. 693–704.
7. Karra S., Painter S. L., Lichtner P. C. Three-phase numerical model for subsurface hydrology in permafrost-affected regions (PFLOTRAN-ICEv1.0). *The Cryosphere*, 8, 1935–1950, 2014. doi: 10.5194/tc-8-1935-2014
8. Painter S. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: model formulation, validation, and applications. *Computational Geosciences*. 2011. Vol. 15(1). pp. 69–85.
9. Zhou, Y. and Zhou, G. Numerical simulation of coupled heat-fluid transport in freezing soils using finite volume method. *Heat and mass transfer*. 2010. Vol. 46. pp. 989–998.
10. Popov V. I. Mathematical modeling of the process of infiltration of high-mineralized solution in frozen massif. *Fundamental and applied problems of hydrometallurgy: materials of the XXI Meeting on the underground waters of Siberia and Far East*. Yakutsk, 2015. pp. 144–146.
11. Vakhromeev I. I. Theoretical basis of rock refilling. Moscow: Nedra, 1968. 291 p.
12. Kaymonov M. V., Khokholov Yu. A. Mathematical modeling of the temperature and humidity mode of the block of freed ore of North mines. *Nauka i obrazovanie*. 2010. No. 1. pp. 27–32.
13. Khokholov Yu. A., Kurilko A. S., Kaymonov M. V., Shubin G. V. Modeling of thermal state of protective bag on Udachnyy mine. *Geomechanical and geotechnological problems of efficient mastering of solid mineral deposits of North and North-East regions of Russia: proceedings of All-Russian scientific-practical conference*. Yakutsk: Publishing House of Melnikov Permafrost Institute (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences), 2011. pp. 273–277.
14. Kutevov A. M., Polyaniin A. D., Zapryanov Z. D., Vyazmin A. V., Kazeninn D. A. Chemical hydrodynamics: reference book. Moscow: Kvantum, 1996. 336 p.
15. Samarskiy A. A. Difference network theory. Moscow: Nauka, 1983. 616 p.