

В.Н. Аптуков, И.Б. Ваулина, А.М. Мачерет
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО
И ПЕРСПЕКТИВНОГО
СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ
ТОЛЩИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
ВЕРХНЕКАМСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ
КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Представлена методика оценки текущего и перспективного состояния водозащитной толщи (ВЗТ) с учетом влияния горно-геологических и техногенных факторов на основе инженерных методов и методов математического моделирования с применением различных критериев безопасного состояния. Она дает возможность проводить оценку не только на локальных «проблемных» участках, но и на всей площади шахтного поля с помощью разработанного алгоритма объединения и визуализации данных по рассматриваемым выемочным зонам на шахтном поле. Методика предполагает выделение природно-техногенных опасных зон (ПТОЗ) на основе анализа величины разработанного авторами общего критерия оценки состояния ВЗТ на рассматриваемом участке. Общий критерий представляет собой алгебраическую сумму частных критериев с заданными весовыми коэффициентами. Частные критерии основаны на оценке природного (геологического) и техногенного факторов. На следующем этапе в выделенных ПТОЗ определяется степень их опасности посредством проведения уточняющего анализа, основанного на инженерных подходах и математическом моделировании. Рассмотрено применение методики на примере одного из действующих рудников Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевых солей (ВКМКС).

Ключевые слова: состояние ВЗТ, общий критерий оценки природно-техногенных опасных зон, математическое моделирование.

Главной особенностью Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) являются сложные гидрогеологические условия [1]. Важнейшей задачей при ведении горных работ на ВКМКС является поддержание сохранности водозащитной толщи (ВЗТ), отделяющей продуктивную толщу от водоносных горизонтов. Несоблюдение сохранности ВЗТ может привести к затоплению рудника или техногенному зем-

летрясению, примерами чего стали три негативных события, произошедшие на ВКМКС за последние десятилетия (1986 г. — затопление Третьего Березниковского рудника; 1995 г. — горно-тектонический удар на Втором Соликамском руднике; 2006 г. — затопление Первого Березниковского рудника).

Произошедшие на ВКМКС негативные события не могут быть объяснены в рамках действующих на месторождении нормативно-методических документов. Таким образом, обязательным условием безопасной эксплуатации месторождения является геодинамическое районирование недр и земной поверхности с выделением потенциально опасных участков на уже отработанных и еще не отработанных площадях.

Ранее авторами была разработана методика для оценки текущего и перспективного состояния ВЗТ [2], в основу которой легли успешно применяемые в ОАО «Галургия» методы оценки геодинамической безопасности недр и земной поверхности [3]. Методика [2] учитывает большое количество влияющих факторов, инженерные подходы и методы математического моделирования, используемые на калийных месторождениях. Отличительной особенностью разработанной методики является возможность проводить оценку не только на локальных «проблемных» участках, но и на всей площади шахтного поля с помощью разработанного алгоритма объединения и визуализации данных по рассматриваемым зонам на шахтном поле, а также использование общего критерия оценки безопасности состояния ВЗТ.

Новый общий критерий оценки природно-техногенных опасных зон (ПТОЗ) шахтного поля рудника основан на частных критериях оценки природного (геологического) и техногенного факторов.

Частные критерии приведены к нормированной форме так, чтобы нарушение частного критерия давало нормированное значение равное или большее единицы.

Общий критерий представлен в виде алгебраической суммы частных критериев с заданными весовыми коэффициентами.

Геологическое строение (природный фактор) отражено в критерии относительного оседания земной поверхности. Природное нетронутое состояние породного массива и ВЗТ описывается допустимыми прогибами ВЗТ, рассчитанными в соответствии с нормативным документом [4].

Таким образом, величина критерия относительного оседания земной поверхности определяется по следующей формуле (при нарушении критерия величина $X_1 > 1$):

$$X_1(t) = \frac{V(t)}{[V_m]}, \quad (1)$$

где $[V_m]$ – величина допустимого прогиба (принимается на основании документа [4]); $V(t)$ – расчетное значение оседания земной поверхности.

Величина $V(t)$ определяется согласно нормативному документу [4], натурным измерениям, либо расчетным путем с применением метода конечных элементов (МКЭ) по системе широтных и субмеридиональных разрезов с последующей интерполяцией по шахтному полю с заданным временным шагом.

Величина техногенного воздействия на природный массив может быть описана степенью нагружения целиков C или коэффициентом извлечения полезного ископаемого ω .

Значения коэффициента извлечения ω , проектируемые при разработке, связаны, в частности, с выполнением условия удовлетворения величины достигнутого прогиба допустимому прогибу пород ВЗТ [4]. Таким образом, если брать в качестве критерия техногенного влияния величину ωm (где m – мощность отрабатываемого пласта), то ее качественное распределение по шахтному полю будет подобным распределению величины допустимого прогиба $[V_m]$.

Известно, что вторым основным параметром, величина которого ограничивается нормативным документом [4], является степень нагружения целиков C , представляющая отношение величины среднего сжимающего напряжения в целике к его прочности на сжатие. Обратная величина $1/C$ является коэффициентом запаса прочности целика. В условиях ползучести соляных пород, чем меньше коэффициент запаса прочности, тем больше скорость деформации целика на стационарной стадии ползучести, и тем меньше время его устойчивого состояния (время до потери несущей способности).

Непосредственное использование степени нагружения C в качестве критерия техногенного воздействия наталкивается на некоторые неудобства. Во-первых, значение степени нагружения (коэффициента запаса прочности) при отработке различных пластов разное. Во-вторых, вызывает затруднение формулировка критерия с использованием C при отработке нескольких пластов.

Более подходящей на наш взгляд величиной, характеризующей степень техногенного влияния, является скорость оседаний целиков (слоев ВЗТ). При отработке нескольких пластов

скорости суммируются, отражая увеличение степени техногенного воздействия на породный массив. Кроме того, скорости деформации целиков являются нелинейными функциями степени нагружения C , то есть более чувствительны к ним.

Критерий техногенного влияния представлен в виде суммарной величины скорости оседания целиков при многопластовой отработке, отнесенной к некоторому предельному (допустимому) значению:

$$X_2(t) = \frac{v_\Sigma(t)}{[v_\Sigma]}. \quad (2)$$

Суммарная величина скорости оседания (целиков) при многопластовой отработке на стационарной стадии деформирования определяется по формуле:

$$v_\Sigma(t) = 3,65[k_1 m_1 \dot{\epsilon}_1 + k_2 m_2 \dot{\epsilon}_2 + k_3 m_3 \dot{\epsilon}_3 + k_4 m_4 \dot{\epsilon}_4], \quad (3)$$

где $k_i = 1$ (для отрабатываемого слоя), $k_i = 0$ (если слой не отрабатывается); m_i — мощность i -го пласта (в мм); $\dot{\epsilon}_i$ — скорость деформации целиков i -го пласта (%/сут).

В формуле (3) подразумевается, что первый пласт — Красный П, второй — АБ, третий — В_С, четвертый — В_К. Полученные значения суммарной скорости оседаний имеют размерность мм/год.

Скорости деформаций (%/сут) целиков i -го пласта на стационарной стадии ползучести вычисляются по формулам Нестерова [5]

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= 10^{5,88(C_1-0,95)}, & \dot{\epsilon}_2 &= 10^{5,88(C_2-0,93)}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= 10^{5,88(C_3-0,93)}, & \dot{\epsilon}_4 &= 10^{4,44(C_4-1,0)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где C_i — степень нагружения целиков i -го пласта.

Суммарная линейная скорость оседания $v_\Sigma(t)$ согласно выражению (3) зависит не только от степени нагружения целиков i -го пласта, но и от их мощности m_i .

Учитывается возможность разрушения технологического междупластья при расчете величины критерия техногенного влияния.

На основе анализа скоростей оседаний земной поверхности на потенциально опасных участках шахтных полей рудников ВКМКС сделан выбор предельного значения суммарной допустимой скорости оседания, которое составило 50 мм/год.

Кинематика процесса оседаний целиков на уровне разрабатываемых пластов согласно [6] в 1,5–2,5 раза превосходит соот-

ветствующие значения на уровне земной поверхности. Поэтому для предельной скорости деформирования целиков по продуктивным пластам было принято значение $[v_{\Sigma}] = 100$ мм/год.

Объединим частные критерии в общий критерий оценки критического состояния природно-техногенной опасной зоны (ПТОЗ) в некоторой области шахтного поля, который будем вычислять по формуле:

$$Z = k_{z1}X_1 + k_{z2}X_2, \quad (5)$$

где k_{zi} – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты должны удовлетворять условию:

$$k_{z1} + k_{z2} = 1, \quad (6)$$

тогда при достижении частными критериями единицы $X_1 = X_2 = 1$, общий критерий также достигает единицы $Z = 1$.

Выбор весовых коэффициентов должен основываться на анализе природных и техногенных факторов на определенном шахтном поле (настройка весовых коэффициентов).

Таким образом, общий критерий оценки состояния ВЗТ учитывает как интегральный критерий накопленных к текущему времени относительных оседаний, так и локальный критерий прошедших событий, которые могут негативно проявить себя в будущем в виде относительной суммарной скорости оседаний целиков.

В данной работе приведены результаты реализации методики в условиях одного из действующих рудников ВКМКС.

На рис. 1 приведено разделение шахтного поля одного из действующих рудников ВКМКС на зоны, районирование которых проводится по геологическому строению породной толщи, аномальному строению ВЗТ и соответствующим параметрам системы разработки.

В каждой зоне было определено значение величины частных критериев (критерия относительного оседания земной поверхности и критерия техногенного влияния), а также значения общего критерия оценки состояния ВЗТ. На основе результатов расчетов с применением алгоритма объединения и визуализации данных по площади шахтного поля были построены распределения различных критериальных величин с определенным временным шагом. На рис. 2 приведено распределение значения общего критерия оценки природно-техногенных опасных зон к 2014 г.

Выделенные ПТОЗ приходится на зоны повышенных оседаний земной поверхности и повторяют контуры мульды оседаний, расположенной в центральной части шахтного поля. Это свидетельствует об удовлетворительном соответствии выбранного критерия натурным данным. В качестве иллюстрации полученного соответствия приведена совмещенная карта изолиний оседаний земной поверхности к 2010 г. и выделенные по общему критерию ПТОЗ (рис. 3).

Далее в выделенных ПТОЗ для определения их степени опасности необходимо проведение уточняющего анализа, основанного на инженерных подходах и математическом моделировании.

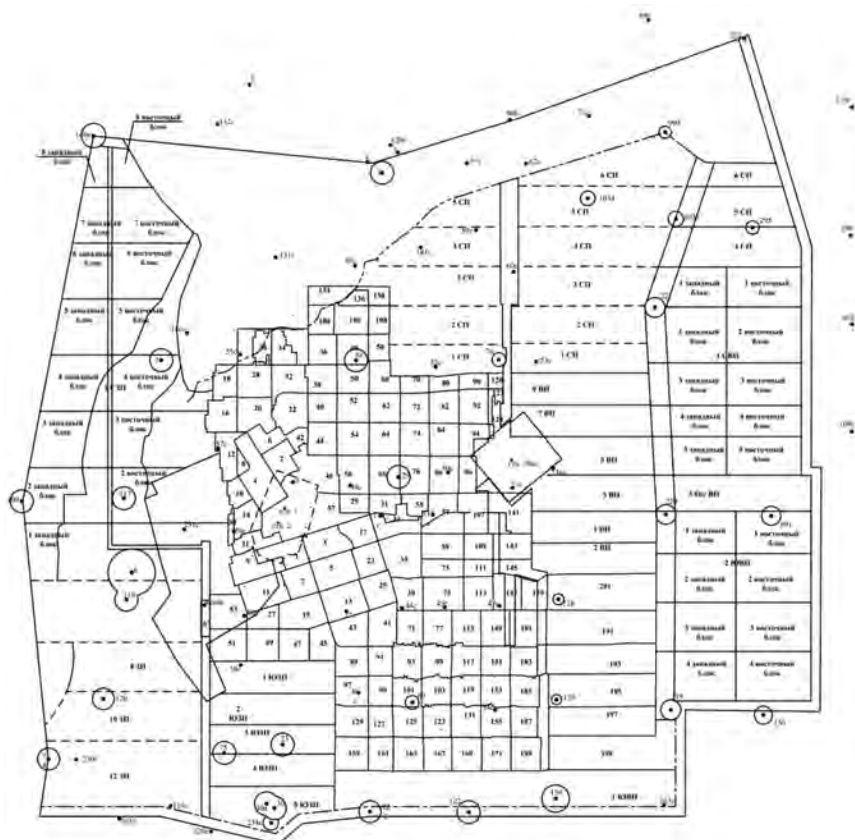


Рис. 1. Схема расположения зон исследования на шахтном поле одного из действующих рудников ВКМКС

В выделенных ПТОЗ ($Z > 1$) необходимо проводить дальнейший мониторинг состояния выработанного пространства и земной поверхности. Построенные математические модели необходимо актуализировать при поступлении новых натурных данных.

Разработанная экспериментальная методика оценки природно-техногенных опасных зон требует развития и подтверждения в течение нескольких лет.

Основные направления развития методики:

- уточнение выбранных критериев оценки состояния ВЗТ (корректировка общих формул, весовых коэффициентов, количества учитываемых факторов);

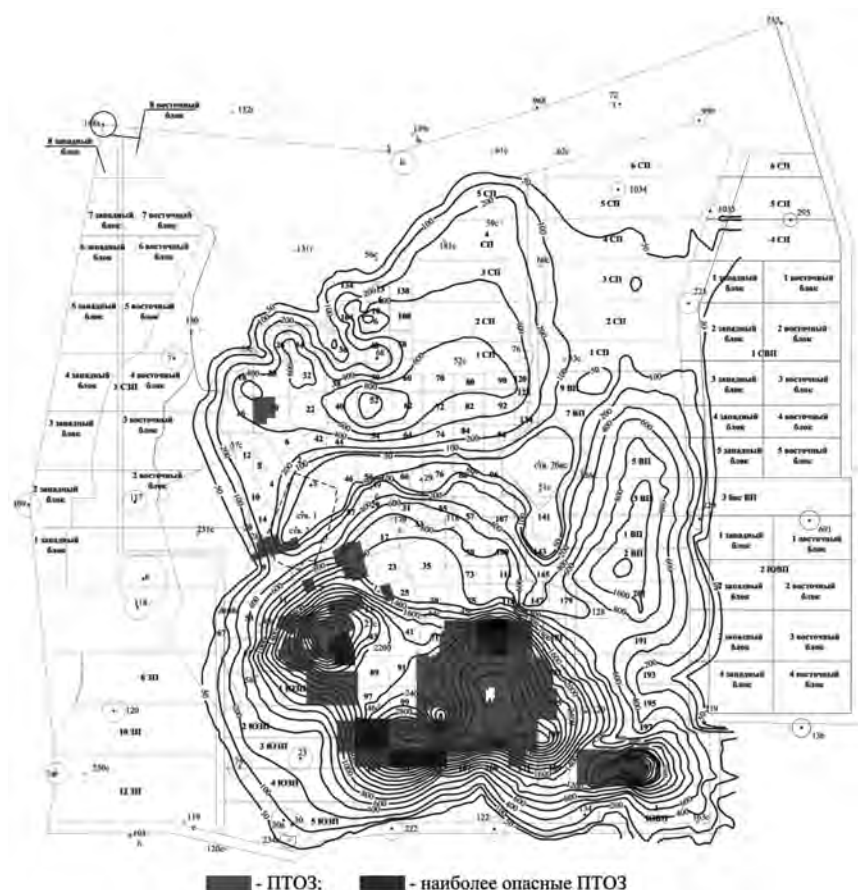


Рис. 3. ПТОЗ и изолинии оседаний земной поверхности

• уточнение физико-математических моделей поведения породного массива и развитие вычислительных технологий решения краевых задач геомеханики соляных и горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреичев А.Н.* Классификация калийных месторождений по гидрогеологическим и инженерно-геологическим условиям // Горный журнал. — 1968. — № 5.

2. *Антуков В.Н., Ваулина И.Б.* Геомеханическая оценка состояния водозащитной толщи в условиях рудников Верхнекамского месторождения калийных солей на основе методов математического моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 4. — С. 334–340.

3. *Гилев М.В., Константинова С.А., Чернопазов С.А.* Некоторые методические подходы, применяемые для оценки геодинамической безопасности недр и земной поверхности при эксплуатации Верхнекамского месторождения калийных солей // Маркшейдерия и недропользование. — 2006. — № 3.

4. *Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождений калийных солей: технологический регламент.* — СПб., 2008.

5. *Рекомендации по расчету устойчивых пролетов очистных выработок на калийных месторождениях.* — Л.: ВНИИГ, 1982.

6. *Шиман М.И.* Предотвращение затопления калийных рудников. — М.: Недра, 1992.

7. *Гилев М.В., Константинова С.А., Чернопазов С.А., Чернопазов Д.С.* Программа для решения плоских задач упруговязкопластичности методом конечных элементов (Earth — 2D.1): заявка № 2010616586 27.10.2010; Правообладатель: ОАО «Галургия». — Свидетельство № 2011610648 о государственной регистрации программы для ЭВМ. зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.01.11.

8. *Константинова С.А.* Об одной феноменологической модели деформирования и разрушения соляных пород при длительном действии сжимающих нагрузок // ФТПРПИ. — 1983. — № 3.

9. *Константинова С.А., Чернопазов С.А.* Развитие наследственной модели деформирования и разрушения соляных пород // ФТПРПИ. — 2004. — № 1. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Антуков Валерий Нагимович*¹ — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: valeryaptukov@gmail.com, зав. кафедрой, Пермский государственный национальный исследовательский университет, e-mail: aptukov@psu.ru,

*Ваулина Инна Борисовна*¹ — научный сотрудник, e-mail: Vaulina.Inna@gallurgy.ru,

Мачерет Александр Маратович — главный маркшейдер, ПАО «Уралкалий», e-mail: Aleksandr.Macheret@uralkali.com,

¹ НИЛ геодинамической безопасности ОАО «Галургия».

**ESTIMATION METHOD OF CURRENT
AND FUTURE CONDITION OF WATER PROOF
FORMATION BY DEVELOPMENT
OF VERKHNEKAMSKOYE POTASH SALT DEPOSIT**

Estimation method of current and future condition of water proof formation (VZT) is presented due to the influence of mining and geological and man-made factors based on engineering methods and mathematic modeling methods applying different criteria of safe condition. Distinctive feature of the developed method is an opportunity to make an assessment not only in the local «problematic» sites, but also on the whole area of the minefield using the developed algorithm of data integration and visualization on the considered extraction zones in the minefield. The method assumes identification of natural and man-made dangerous zones (PTOZ) based on the analysis of the value of the general estimation criteria of VZT condition in the considered site developed by the authors. The general criteria represents an algebraic sum of partial criterions with specified weight coefficients. The partial criterions are based on the assessment of natural (geological) and man-made factors. The partial criterions and consequently the general criteria are reduced to normalized form, so that distortion of the partial criterion provides rated value equal or larger than one. In the next stage in the identified PTOZ a degree of their danger is determined through clarifying analysis based on engineering methods and mathematic modeling. Application of the method by the example of one of the actual mines of Verkhnekamskoye potash and potash-magnesium salt deposit (VKMKS) is considered.

Key words: VZT condition, general estimation criteria of natural and man-made dangerous zones, mathematic modeling.

AUTHORS

*Aptukov V.N.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,

e-mail: valeryaptukov@gmail.com,

Head of Chair, Perm State National Research University, 614000, Perm,

e-mail: aptukov@psu.ru,

*Vaulina I.N.*¹, Researcher, e-mail: Vaulina.Inna@gallurgy.ru,

Macheret A.M., Chief Surveyor of «Uralkali» PJSC,

618426, Perm krai, Berezniki, e-mail: Aleksandr.Macheret@uralkali.com,

¹ Associate of Research Laboratory on geodynamic safety of «Galguria» OJSC, 614002, Perm.

REFERENCES

1. Andreichev A.N. *Gornyi zhurnal*. 1968, no 5.
2. Aptukov V.N., Vaulina I.B. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014, no 4, pp. 334–340.
3. Gilev M.V., Konstantinova S.A., Chernopazov S.A. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*. 2006, no 3.
4. *Ukazaniya po zashchite rudnikov ot zatopeniya i okhrane podrabatyvaemykh ob"ektov v usloviyakh Verkhnekamskogo mestorozhdenii kaliinykh solei: tekhnologicheskii reglament* (Instructions for mine protection against flooding and protection of the undermined objects in conditions of Verkhnekamskoye potash salt deposit. Process regulation), Saint-Petersburg, 2008.

5. *Rekomendatsii po raschetu ustoichivyykh proletoy ochistnykh vyrabotok na kaliinykh mestorozhdeniyakh* (Recommendations on estimation of sustainable spans of stopes in potash deposits), Leningrad, VNIIG, 1982.

6. Shiman M.I. *Predotvrashchenie zatopeniya kaliinykh rudnikov* (Prevention of potash mine flooding), Moscow, Nedra, 1992.

7. Gilev M.V., Konstantinova S.A., Chernopazov S.A., Chernopazov D.S. Свидетельство № 2011610648 о государственной регистрации программы для ЭВМ, 11.01.11.

8. Konstantinova S.A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1983, no 3.

9. Konstantinova S.A., Chernopazov S.A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2004, no 1.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫВОДА МЫШЬЯКА ПРИ ОБЖИГЕ ЗОЛОТО-КВАРЦ-МЫШЬЯКОВИСТОЙ РУДЫ

Гуляшинов Павел Анатольевич — инженер БИП СО РАН, e-mail: gulpasha@mail.ru,

Палеев Павел Леонидович — кандидат технических наук, научный сотрудник, БИП СО РАН, e-mail: palpavel@mail.ru,

Гуляшинов Анатолий Никитич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник БИП СО РАН, e-mail: agul50@mail.ru.

Антропова Инна Германовна — кандидат технических наук, зав. лабораторией, БИП СО РАН, e-mail: inan@binm.bscnet.ru.

Приведены результаты экспериментальных исследований кинетических особенностей процесса обжига золотосодержащей скородитовой руды в атмосфере водяного пара. Установлено, что зависимость степени деарсенизации от продолжительности обжига удовлетворительно описывается уравнением Ерофеева-Колмогорова. Доказано, что при обжиге скородита с пиритом в атмосфере перегретого водяного пара физико-химические процессы протекают в диффузионной области.

Ключевые слова: кинетика, константа скорости, энергия активации, обжиг.

KINETIC FEATURES OF OUTPUT OF ARSENIC IN ROASTING GOLD-QUARTZ-ARSENIC ORE

*Gulyashinov P.A.*¹, Engineer,

*Paleev P.L.*¹, Candidate of Technical Sciences, Researcher,

*Gulyashinov A.N.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

*Antropova I.G.*¹, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory,

¹ Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Russia.

The results of experimental research of the kinetic features of the roasting process of gold ore scorodite in an atmosphere of water vapor. It was found that the degree of dependence on the duration of the firing of the firing dearsenization satisfactorily described by the Kolmogorov-Erofeev. It is proved that when firing scorodite with pyrite in an atmosphere of superheated steam physical and chemical processes occur in the diffusion area.

Key words: kinetics, the rate constant, activation energy, roasting.