

## ХАРАКТЕРНАЯ ТЕМПЕРАТУРА МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД И МИНЕРАЛОВ ПРИ НАГРЕВЕ СВЧ-ВОЛНАМИ

К.Т. Тажибаев<sup>1</sup>, Р.М. Султаналиева<sup>2</sup>, К.М. Маканов<sup>1</sup>, Д.К. Тажибаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика, e-mail: kushbak@yandex.ru

<sup>2</sup> Кыргызский Государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

**Аннотация:** Применен способ измельчения руд, при котором до стадии измельчения навески руды подвергаются воздействию СВЧ электромагнитными волнами с разной продолжительностью, облученная СВЧ-волнами навеска и исходная навеска в необлученном состоянии по отдельности измельчаются в вертикальном копре с помощью свободно падающего с определенной высоты груза. На основе этого способа получены графики «удельная энергоемкость измельчения — продолжительность времени воздействия СВЧ-волн». Показано, что внутренние структурные изменения и образование микротрещин в горных породах от воздействия СВЧ-волн связаны с неравномерным нагревом разнородных минералов с разными теплофизическими свойствами, при этом энергия СВЧ-волн, поглощаясь разными минералами горной породы (руды), преобразуется в тепловую энергию. Получена формула, описывающая зависимость теплоемкости горных пород и минералов от продолжительности воздействия СВЧ-волн, следовательно, от температуры. Исходя из полученной формулы теплоемкости и функциональной зависимости температуры от продолжительности воздействия СВЧ-волн, построены графики «температура – продолжительность времени воздействия СВЧ-волн» для разных горных пород и минерала кварца. Экспериментально выявлена новая температурная характеристика горных пород и руд — критическая температура разупрочнения, соответствующая минимальному значению энергоемкости их измельчения при наименьшей температуре.

**Ключевые слова:** горная порода, минерал, руда, измельчение, энергоемкость измельчения, электромагнитная волна, теплоемкость, тепловая энергия, разупрочнение.

**Для цитирования:** Тажибаев К. Т., Султаналиева Р. М., Маканов К. М., Тажибаев Д. К. Характерная температура минимальной энергоемкости измельчения руд и минералов при нагреве СВЧ-волнами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 65–76. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-65-76.

### Representative temperature at minimum energy content of ore and mineral milling in super high frequency heating

K.T. Tazhibayev<sup>1</sup>, R.M. Sultanaliyeva<sup>2</sup>, K.M. Makanov<sup>1</sup>, D.K. Tazhibayev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geomechanics and Development of Bowels, National Academy of Sciences of Kirghiz Republic, Bishkek, Kirghiz Republic, e-mail: kushbak@yandex.ru

<sup>2</sup> I. Razzakov Kirghiz State Technical University, Bishkek, Kirghiz Republic

---

**Abstract:** The ore milling method with preliminary heating of ore samples by SHF electromagnetic waves of different length is used in the studies. The SHF-treated sample and the unexposed initial sample were then separately milled in an impact testing machine by a gravity load falling from a certain height. As a result, the plots of specific energy content of milling as function of SHF treatment duration were obtained. The internal structural changes and micro cracking under SHF heating are connected with nonuniform heating of dissimilar minerals with different thermophysical properties. Different minerals of rocks and ore absorb energy of SHF waves and convert it to thermal energy. The relation of the heat capacity of rock and ore minerals and the SHF treatment duration and, consequently, temperature is obtained. Using the heat capacity formula and the functional relationship of the temperature and SHF treatment duration, the temperature–SHF treatment time curves are plotted for different rocks and for quartz. A new temperature characteristic of rocks and ore is experimentally discovered—the critical softening temperature fitting the minimum energy content of milling at the lowest temperature.

**Key words:** rock, mineral, ore, milling, milling energy content, electromagnetic wave, heat capacity, thermal energy, softening.

**For citation:** Tazhibayev K. T., Sultanalieva R. M., Makanov K. M., Tazhibayev D. K. Representative temperature at minimum energy content of ore and mineral milling in super high frequency heating. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(9):65-76. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-65-76.

---

## Введение

В технологической цепочке по добыче, переработке и извлечению из руд металлов или других полезных компонентов процесс измельчения является наиболее энергоемким и дорогостоящим. Это в определенной мере связано с весьма низким коэффициентом полезного действия существующих механических способов дробления и измельчения горных пород, руд и минералов, предшествующих по технологической схеме процессам обогащения, флотации и извлечения полезной товарной продукции в виде чистых слитков металлов или других полезных компонентов. В настоящее время доказано, что для существенного уменьшения прочности скальных горных пород и крепких руд и снижения энергоемкости их измельчения наиболее перспективным является воздействие на них перед измельчением электромагнитным полем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона.

Исследователи отмечают, что при переработке горных пород и минералов в горнорудной промышленности имеется

повышенный спрос на новые энергоэкономичные и эффективные технологии по извлечению из горных пород полезной продукции. В связи с этим возникает возрастающий интерес к применению технологий, предусматривающих воздействие на горные породы переменными источниками энергии, такими как микроволновая энергия. В то время как лабораторные испытания в этой области проводились более тридцати лет тому назад, доведение до промышленного применения указанной технологии и в настоящее время остается нерешенным ключевым вопросом [1].

Переработка без потерь, обеспечивающая полное отделение ценных полезных компонентов от пустых пород, приводит к высоким энергетическим затратам. Одним из методов, позволяющим улучшить эффективность извлечения полезных компонентов, является метод, предусматривающий применение предварительной микроволновой обработки руд. Микроволны могут выборочно интенсивно нагревать определенные полезные компоненты (поглотители) в пре-

делах руды, вызывая внутренние напряжения и формируя разрывы вдоль границ зерен. Микроволновая предварительная обработка руды, содержащей поглощающие полезные компоненты и микроволново-прозрачную рудную породу, может значительно уменьшить энергию измельчения [2].

При микроволновой сортировке медных руд непрерывное наблюдение с помощью радиовидения высокой пропускной способности, сопровождаемое инфракрасным тепловым отображением (МВТ-IR), позволяет обеспечить эффективное разделение многих медных минералов и забраковать значительную часть пустых фрагментов от материала рудного сорта. Однако при этом данный сортировочный процесс снижает долю гидратируемых глин и пирита. Впервые отмечается, что избирательность в микроволновой обработке руд, содержащих полупроводящие компоненты, является следствием магнитного поглощения (индукционный нагрев), вызванного вихревыми токами, связанными с узлом магнитного поля электромагнитной энергии. При применении радиочастоты, где электрическое поле составляет доминирующий узел, нагревание полупроводящих полезных компонентов ограничивается эффектом экранирования электрического поля [3].

В работе [4] сообщается о безвредном для окружающей среды методе получения кварцевого порошка из галечного сырья благодаря металлургической переработке, включающей микроволновую предварительную обработку, дробление, скабливание, магнитное разделение и кислотное выщелачивание. В результате такой обработки получается кварцевый порошок, имеющий 80%-е очищение от остаточных примесей по сравнению с необработанным галечным кварцевым сырьем. Предварительная обработка кварцевого галечника в мно-

гоярской микроволновой полости в течение 10 мин привела к снижению остаточного примесного продукта, связанного с включениями, содержащими кальций, калий и натрий на 84, 78, и 50% соответственно. При этом также наблюдалось значительное сокращение (83%) остаточных алюминиевых фаз. Механически это было достигнуто выборочным нагреванием примеси, содержащей микрораздробленные включения. Авторы утверждают, что для производства высокосортного солнечного кремния естественные кварцевые галечники необходимо перерабатывать с использованием комбинации микроволнового облучения, магнитного и химического воздействия.

Российскими учеными были рассмотрены результаты исследований специалистов и ученых в области применения микроволн для оттаивания мерзлых грунтов и разупрочнения горных пород [5].

Нами разработан способ измельчения руд и минералов [6], заключающийся в том, что определяется оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ-волн, соответствующее минимальному значению удельной энергоемкости измельчения изучаемой руды. Для этого выявляется удельная энергоемкость измельчения для исходного состояния и для состояний при разных величинах длительности СВЧ-воздействия (минуты) на навески руды.

### **Методы исследования**

В предлагаемом методе оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов [7] конечной целью исследований являлось снижение энергоемкости измельчения руд и минералов, уменьшение износа металлических частей мельниц и увеличение выхода полезных компонентов при их извлечении из руд и минералов. По данному методу для исследований отбирают пробу руды, из которой изготавлива-

ют навески (куски со средним размером 20–25 мм по 25 шт для каждого режима СВЧ-воздействия). Опыты для каждого режима повторяются 5 раз.

В одном опыте измельчается по 5 кусков предварительно обработанной СВЧ-волнами и не обработанной исходной руды свободно падающим грузом по известной методике определения коэффициента крепости по толчению [8]. Предусматриваемые в опытах предварительные импульсные воздействия СВЧ-волнами способствуют селективному раскрытию ценных компонентов.

Исследователи, изучающие электроимпульсное разрушение горных пород [9], отмечают, что традиционные механические методы разрушения не обладают селективностью и при их использовании происходит частичное нарушение форм кристаллов и зерен извлекаемых минералов, а также загрязнение продуктов переработки аппаратурным металлом.

Российскими учеными показана возможность создания технологии «взрывного» разрушения массива горных пород электромагнитным потоком концентрированной энергии СВЧ-волн [10].

Нашими опытами установлено [11], что переломная продолжительность времени воздействия СВЧ-волн и характерная для данной руды температура, при которой реализуется эффективное измельчение руд и минералов, соответствует минимуму энергоемкости их измельчения. При увеличении продолжительности действия СВЧ-волн на более чем 1 мин температура горной породы повышается не строго по линейному закону, и поэтому необходимо определить графики зависимости температуры от продолжительности воздействия СВЧ-волн для каждой разновидности породы и минерала при разных уровнях температуры. Для исследования влияния СВЧ-волн на энергоемкость измельче-

ния, как указано выше, из рудного месторождения отбирают необходимое для обеспечения представительности количество минерала или руды (обычно отбирают по одной пробе из каждого места, в котором нужно определить показатели, чтобы можно было получить необходимое количество навесок). Навески получают, раскалывая отобранные пробы. Для каждого отдельного определения используется, как указано выше, 5 навесок. Полученные этим методом данные отличаются сравнительно невысоким коэффициентом вариации, равным в среднем 10–15%. Нами для облучения руд и горных пород в исследованиях использовалась СВЧ-печь (микроволновая печь). Применялся уровень мощности 700 Вт. При этом частота микроволн составляла 2450 МГц, полезный объем печи — 0,03 м<sup>3</sup>. Образцы руд навесками по 200–250 г и средними размерами 20–25 мм помещались внутрь печи и облучались СВЧ-импульсами. Продолжительность воздействия СВЧ-волн составляла от 1 до 12 мин.

В зависимости от руды и минерала исследуемые навески подвергались облучению СВЧ-волнами по следующим интервалам (через 2 мин) выдержки: 1; 3; 5; 7; 9 мин и от 1 до 12 мин с интервалом 1 мин. Для каждого интервала продолжительности СВЧ-воздействия определяется удельная энергоемкость измельчения руды или горной породы, минерала.

Внутренние структурные изменения и образования микронарушений сплошности горных пород в условиях распространения в их объеме СВЧ-волн связаны с неравномерным нагревом разнородных минералов с разными теплофизическими свойствами. При этом энергия СВЧ-волн, поглощаясь разными минералами горной породы (руды), преобразуется в тепловую энергию. В зависимости от свойств минералов при

СВЧ-облучении температура горной породы повышается на  $dT$

$$dT = \frac{Wt}{c\rho}, \quad (1)$$

где  $W$  – мощность СВЧ-волн, поглощаемая единицей объема породы;  $t$  – время (продолжительность) воздействия СВЧ-волн;  $c$  – удельная теплоемкость горной породы;  $\rho$  – плотность горной породы.

С учетом значения  $dT = T_2 - T_1$  и  $W = N/v$  из формулы (1) получим:

$$T_2 - T_1 = \frac{Nt}{vcp} \quad (2),$$

где  $v$  – объем навески породы;  $T_1$  – первоначальная температура, К;  $T_2$  – температура при соответствующей длительности нагрева ( $t, c$ ) в К;  $N$  – мощность СВЧ-установки.

Температуру породы (руды) для разной длительности действия СВЧ-волн можно определить по формуле (2) и с учетом данных таблицы.

### Результаты исследований

Для гранодиорита с удельной теплоемкостью  $c = 0,65$  кДж/(кг · К) (см. таблицу) и с учетом навески (пробы) гранодиорита месторождения Токтозан с размерами  $2 \times 2 \times 2,5$  см, плотностью  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, объемом  $v = (2 \times 2 \times 2,5) \cdot n = (2 \times 2 \times 2,5) \cdot 5 = 50$  см<sup>3</sup>, где  $n$  – количество кусков, определим температуру нагрева руды для продолжительности действия СВЧ-волн  $t = 40$  с по формуле (2) [11].

$$dT = \frac{Nt}{c\rho v} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 40 \text{ с}}{0,65 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = 28 \text{ кДж} / 0,088 \text{ кДж/К} = 318 \text{ К},$$

тогда в градусах Цельсия

$$T_2 = dT + T_1 = 44,85 + 20 = 65 \text{ }^\circ\text{C},$$

### Удельная теплоемкость горных пород рудных месторождений [12]

#### Specific heat of rocks of ore fields [12]

Название горной породы	Удельная теплоемкость $C$ , кДж/(кг·К)
диабаз	0,77
кварцит	0,72 – 0,85
кварцито-песчаник	0,79
сидерит	0,7 – 0,73
магнетит	0,5 – 0,6
скарн гранат магнетитовый	0,68 – 0,74
карбонат кальцитовый	0,34
известняк	0,45
карбонат доломитовый	0,98
сланцы окварцованные	0,79
гранит	0,87 – 0,6
известняк	0,9 – 1
гранодиорит	0,65
песчаник	0,78
мрамор	0,6 – 0,9
гранит	0,73
апатит	0,7
гипс	0,9 – 1
гранит красный	0,8 – 0,9
алевролит	0,8 – 0,9
песчаник с известковым цементом	1,38

так как  $dT = 318 \text{ К} = 44,85 \text{ }^\circ\text{C}$  и начальная температура  $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Известно, что при повышении температуры повышается удельная теплоемкость горных пород. Считается, что при температуре от 273 до 773 К (от 0 до 500 °С) теплоемкость горных пород изменяется практически по линейному закону. Для определения удельной теплоемкости горных пород для соответствующей температуры предположим, что температура горной породы будет возрастать с увеличением времени воз-

действия СВЧ-волн. Тогда удельная теплоемкость будет изменяться от продолжительности воздействия СВЧ-волн, то есть можно предположить увеличение удельной теплоемкости (по сравнению с удельной теплоемкостью исходного состояния) от повышения температуры за счет увеличения продолжительности действия СВЧ-волн:

$$C_T = C + C T_K t \quad (3),$$

где  $C_T$  – удельная теплоемкость для соответствующей температуры (времени воздействия СВЧ-волн);  $C$  – удельная теплоемкость исходного состояния (начальная, для комнатной температуры);  $T_K$  – коэффициент имеющий размерность 1/мин;  $t$  – продолжительность СВЧ-воздействия в минутах.

На основе экспериментальных исследований установлено, что коэффициент  $T_K = 0,25$  (1/мин) [11], тогда зависимость удельной теплоемкости горных пород.

$$C_T = C + 0,25C t \quad (4)$$

Формула (4) справедлива для температур от 0 до 1000 °С, так как выше этой температуры в горных породах возможны процессы структурного разложения.

Для получения теоретической зависимости изменения температуры от продолжительности воздействия на руду СВЧ-волн сначала определяется удельная теплоемкость для соответствующих температур по формуле (4) с учетом удельной теплоемкости (исходного состояния) данной породы или руды (по данным таблицы). Затем определяется температура для каждой продолжительности времени воздействия СВЧ-волн по формулам (1) и (2), далее по результатам строится график зависимости температуры от продолжительности времени воздействия СВЧ-волн на горную породу.

### Обсуждение результатов

На рис. 1 представлен теоретический график изменения температуры от продолжительности воздействия СВЧ-волн для гранодиорита месторождения Токтозан. Как видно из рисунка, выше 566 °С и при дальнейшем увеличении времени воздействия СВЧ-волны температура руды изменяется нелинейно. Следует также отметить, что температура 566 °С соответствует трехминутному СВЧ-воздействию, и при этой продолжительности

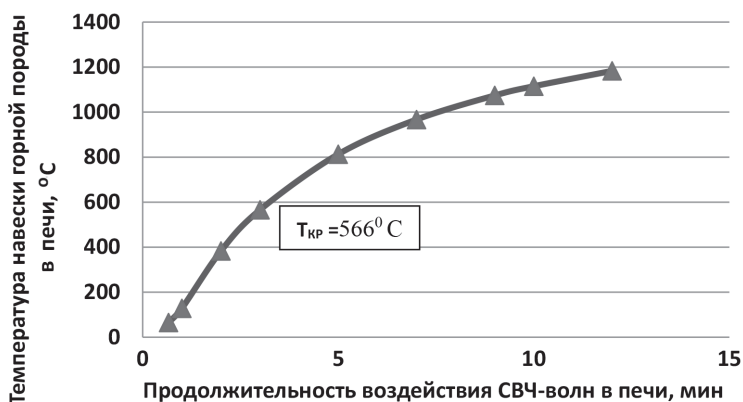


Рис. 1. График зависимости температуры навески руды (гранодиорит, Токтозан) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Fig. 1. Schedule of dependence of temperature of piece ores (granodiorite, Toktozan) from duration of affecting over high-frequency waves

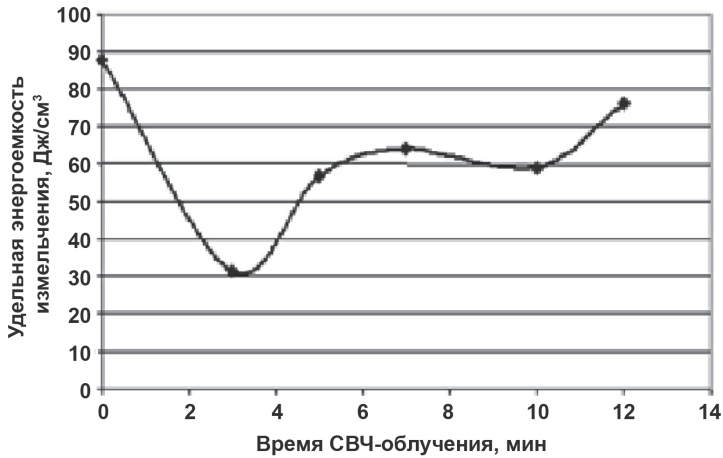


Рис. 2. График зависимости удельной энергоёмкости измельчения (диорит, Токтозан) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Fig. 2. The schedule of dependence specific power consumption of crushing (diorite, Toktozan) from duration of affecting over high-frequency waves

сти времени воздействия обеспечивается минимальность удельной энергоёмкости измельчения, что экспериментально четко выделяется на графике (рис. 2), тогда как переломное изменение на графике «температура — продолжительность воздействия СВЧ-волн» выделяется менее четко (рис. 1).

Как видно из рис. 2, дальнейшее увеличение времени воздействия волн на

оборот приводит к увеличению энергоёмкости измельчения. Следует отметить, что переломное время воздействия СВЧ-волн — 3 мин, а следовательно, и переломная температура 566 °С может служить характеристикой для гранодиорита Токтозанского месторождения, при которой реализуется эффективное измельчение. Для данной горной породы (руды) месторождения температуру 566 °С на-

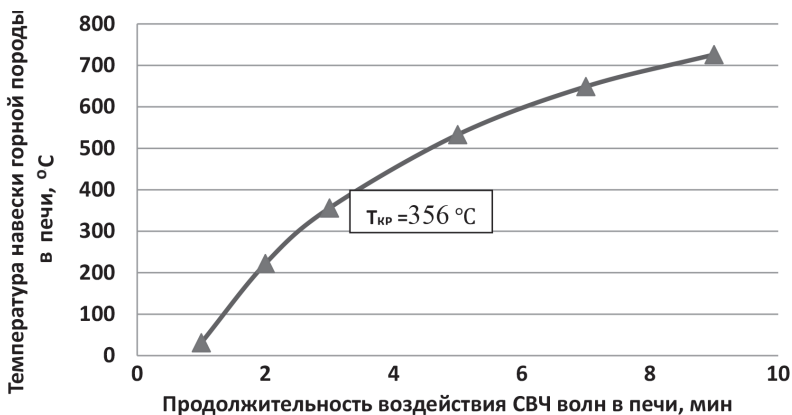


Рис. 3. График зависимости температуры навески руды (темносерый филлит, Кумтор) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Fig. 3. Schedule of dependence of temperature of piece ores (dark grey phyllite, Kumtor) from duration of affecting over high-frequency waves

зываем критической температурой, то есть для этой породы  $T_{кр} = 566 \text{ }^\circ\text{C}$ . Следует также отметить, что выше данной температуры характер изменения графика становится криволинейным, и изменение температуры от продолжительности воздействия СВЧ-волн замедляется (рис. 1).

Для темно-серого филлита месторождения Кумтор принимаем исходную удельную теплоемкость  $c = 0,79 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  (таблица, сланцы) [12, 13]. Далее определяются по формулам, указанным выше, удельные теплоемкости для соответствующих температур (времени воздействия СВЧ-волн) и теоретический график зависимости температуры горной породы от времени воздействия СВЧ-волн.

На рис. 3 представлен график изменения температуры от продолжительности СВЧ-воздействия для темно-серого филлита месторождения Кумтор. Как видно из рисунка, выше  $356 \text{ }^\circ\text{C}$  температура руды от продолжительности СВЧ-воздействия изменяется нелинейно. В данном случае температура  $356 \text{ }^\circ\text{C}$  соответствует трехминутному СВЧ-воз-

действию, и при этой продолжительности времени воздействия волн на данную горную породу (руды) удельная энергоемкость измельчения минимальная (рис. 4). Следовательно, критическая температура  $T_{кр} = 356 \text{ }^\circ\text{C}$  может служить характеристикой для темно-серого филлита месторождения Кумтор, так как при этой температуре реализуется эффективное измельчение данной руды.

Из рис. 4 видно, что дальнейшее увеличение времени воздействия волн наоборот приводит к увеличению энергоемкости измельчения. Таким образом, температура  $356 \text{ }^\circ\text{C}$  для данной породы обеспечивает максимальное разупрочнение при минимальной энергозатрате.

Для кварца Восточно-Коунрадского месторождения минимальная энергоемкость измельчения обеспечивается при трехминутном воздействии СВЧ-волн. При этой продолжительности СВЧ-воздействия расчетная температура (формула (4)) составляет  $484 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5), следовательно, данная критическая температура ( $T_{кр} = 484 \text{ }^\circ\text{C}$ ) для минерала кварц месторождения Восточный-Коунрад мо-

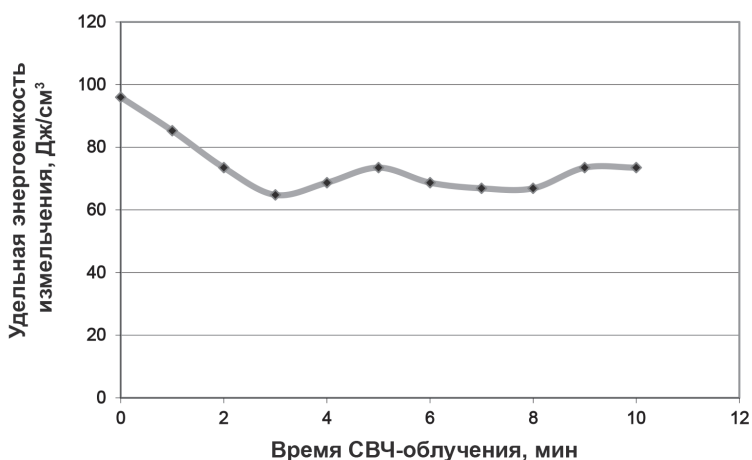


Рис. 4. График зависимости удельной энергоемкости измельчения темно-серого филлита (Кумтор) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Fig. 4. The schedule of dependence specific power consumption of crushing dark grey phyllite (Kumtor) from duration of affecting over high-frequency waves



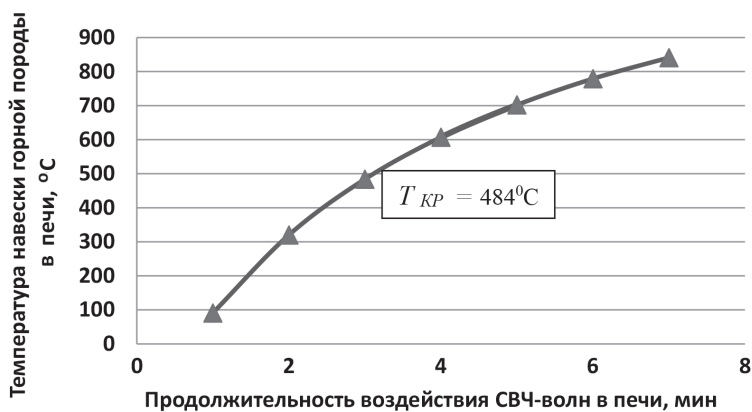


Рис. 5. График изменения температуры навески руды (кварц, Восточный-Коунрад) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Fig. 5. Schedule of change of temperature of piece ores (quartz, East-Kounrad) from duration of affecting over high-frequency waves

жет служить характеристикой, указывающей на максимальное разупрочнение минерала при данной температуре, что связано с полиморфным переходом кварца из одного структурного состояния в другое.

Для известняка Ак-Татырского месторождения минимальная энергоёмкость измельчения обеспечивается также при трехминутном воздействии СВЧ-волн. При этой продолжительности СВЧ

воздействия расчетная температура составляет  $455^\circ\text{C}$ , следовательно, данная температура ( $T_{кр} = 455^\circ\text{C}$ ) для известняка Ак-Татырского месторождения является температурной характеристикой максимального разупрочнения.

На рис. 6 представлен график изменения температуры от продолжительности СВЧ-воздействия, при котором обеспечивается минимальность энергоёмкости измельчения, на известняк ме-

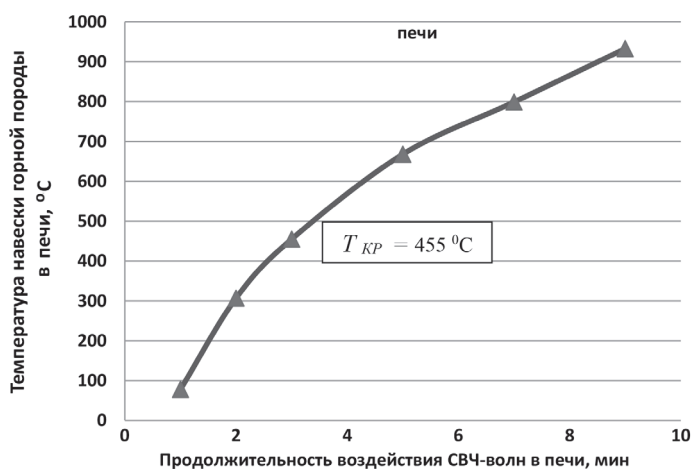


Рис. 6. График изменения температуры навески руды (известняк, Ак-Татыр) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Fig. 6. Schedule of change of temperature of piece ores (limestone, Ak – Tatyр) from duration of affecting over high-frequency waves

сторождения Ак-Татыр с указанием критической температуры. Как видно из рисунка, выше критической температуры  $T_{кр} = 455$  °С начинается излом графика температуры и замедление темпа роста температуры от величины продолжительности времени воздействия СВЧ-волн.

Исходя из расчетных и экспериментальных данных, указанных выше, можно отметить, что выявлена новая температурная характеристика горных пород, руд и минералов — критическая температура разупрочнения, соответствующая минимальному значению энергоем-

кости их измельчения при наименьшей температуре.

### **Заключение**

Установлены зависимости температуры от продолжительности воздействия СВЧ-волн для разных горных пород. Для скальных горных пород, руд и минералов установлена температурная характеристика — критическая температура разупрочнения, соответствующая максимальному разупрочнению (минимальность энергоемкости измельчения) при наименьшем нагреве от воздействия СВЧ-волн.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Bobicki E. R., Pickles C. A., Forster J., Hutcheon R.* High temperature permittivity measurements of selected industrially relevant ores: Review and analysis // *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 145.
2. *Marion Ch., Jordens A., Maloney C., Langlois R.* Effect of microwave radiation on the processing of a Cu-Ni sulphide ore // *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2015. Vol. 94. No 1. Pp. 15–21.
3. *Ferrari R., Batchelor A. R., Katrib J., Dodds C., Kingman S. W.* Understanding selectivity in radio frequency and microwave sorting of porphyry copper ores // *International Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 155. Pp. 64–73.
4. *Buttress A. J., Rodriguez J. M., Ure A., Ferrari R. S., Dodds C., Kingman S. W.* Production of high purity silica by microfluidic-inclusion fracture using microwave pre-treatment // *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 131. Pp. 407–410.
5. *Рахманкулов Д. Л., Шавшукова С. Ю., Вихарева И. Н., Чанышев Р. Р.* Опыт применения энергии микроволн в горном деле // *Башкирский химический журнал*. — 2008. — Т. 15. — № 2. — С. 114–117.
6. *Тажибаев К. Т., Султаналиева Р. М.* Энергосберегающий способ измельчения крепких руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2015. — № 12. — С. 76–82.
7. *Тажибаев К. Т., Султаналиева Р. М., Акматалиева М. С., Тажибаев Д. К.* Метод оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов // *Известия КГТУ имени И. Раззакова*. — 2013. — № 29. — С. 303–310.
8. *Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф.* Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969. — 452 с.
9. *Юшков А. Ю.* Электроимпульсное разрушение горных пород // *Современные научные исследования и инновации*. — 2015. — № 4-2(48). — С. 67–71. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/52486>.
10. *Блинов Л. М., Герасименко А. П., Гуляев Ю. В., Долголаптев А. В., Черепенин В. А.* О возможности создания технологии «взрывного» разрушения массива горных пород диэлектриков направленным электромагнитным потоком концентрированной энергии СВЧ // *Журнал радиоэлектроники*. — 2019. — № 2. — С. 129–134. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.2.4.
11. *Тажибаев К. Т., Султаналиева Р. М.* Результаты исследования закономерности изменения температуры руд от продолжительности времени воздействия на них СВЧ волнами // *Вестник КРСУ*. — 2015. — Т. 15. — № 5. — С. 135–140.

12. *Справочник* (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. — М.: Недра, 1975. — 279 с.
13. *Ильницкая Е. И. и др.* Свойства горных пород и методы их определения. — М.: Недра, 1969. — 452 с. **МИАБ**

## REFERENCES

1. Bobicki E. R., Pickles C.A., Forster J., Hutcheon R. High temperature permittivity measurements of selected industrially relevant ores: Review and analysis. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 145.
2. Marion Ch., Jordens A., Maloney C., Langlois R. Effect of microwave radiation on the processing of a Cu-Ni sulphide ore. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2015. Vol. 94. No 1. Pp. 15–21.
3. Ferrari R., Batchelor A. R., Katrib J., Dodds C., Kingman S.W. Understanding selectivity in radio frequency and microwave sorting of porphyry copper ores. *International Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 155. Pp. 64–73.
4. Buttress A. J., Rodriguez J. M., Ure A., Ferrari R. S., Dodds C., Kingman S.W. Production of high purity silica by microfluidic-inclusion fracture using microwave pre-treatment. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 131. Pp. 407–410.
5. Rakhmankulov D. L., Shavshukova S. Yu., Vikhareva I. N., Chanyshv R. R. Experience of microwave energy use in mining. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal*. 2008, vol. 15, no 2, pp. 114–117.
6. Tazhibaev K. T., Sultanalieva R. M. Energy-saving milling method for hard ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 12, pp. 76–82.
7. Tazhibaev K. T., Sultanalieva R. M., Akmatalieva M. S., Tazhibaev D. K. Method of optimized softening and milling of hard ore and minerals. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2013, no 29, pp. 303–310.
8. Il'nitskaya E. I., Teder R. I., Vatolin E. S., Kuntyshev M. F. *Svoystva gornykh porod i metody ikh opredeleniya* [Properties of rocks and determination methods], Moscow, Nedra, 1969, 452 p.
9. Yushkov A. Yu. Electric pulse destruction of rocks. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2015, no 4-2(48), pp. 67–71. <http://web.snauka.ru/issues/2015/04/52486>.
10. Blinov L. M., Gerasimenko A. P., Gulyaev Yu. V., Dolgolaptev A. V., Cherepenin V. A. Feasibility of technology for explosive rupture of rocks—dielectrics by directional electromagnetic flow of concentrated SHF energy. *Zhurnal radioelektroniki*. 2019, no 2, pp. 129–134. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.2.4.
11. Tazhibaev K. T., Sultanalieva R. M. Studies of temperature variation patterns as function of duration of ore treatment by SHF waves. *Vestnik Kyrgyzsko-rossiyskogo slavyanskogo universitet*. 2015, vol. 15, no 5, pp. 135–140.
12. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod*. Pod red. N.V. Mel'nikova, V.V. Rzhhevskogo, M.M. Protod'yakonova [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks. Mel'nikov N. V., Rzhhevskiy V. V., Protod'yakonov M. M. (Eds.)], Moscow, Nedra, 1975, 279 p.
13. Il'nitskaya E. I. *Svoystva gornykh porod i metody ikh opredeleniya* [Properties of rocks and determination methods], Moscow, Nedra, 1969, 452 p. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Тажобаев Кушбакали Тажибаевич*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: kushbak@yandex.ru,  
*Султаналиева Рая Мамакеевна* — д-р физ.-мат. наук, профессор, проректор по научной работе и внешним связям, Кыргызский Государственный технический университет им. И. Раззакова,  
*Маканов Каныбек Манасович*<sup>2</sup> — аспирант,

Тажибаяв Данияр Кушбакалиевич<sup>1</sup> — канд. техн. наук, зав. лабораторией,

<sup>1</sup> Институт геомеханики и освоения недр

Национальной академии наук Кыргызской Республики.

**Для контактов:** Тажибаев К.Т., e-mail: kushbak@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Tazhibayev K.T.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, e-mail: kushbak@yandex.ru,

*Sultanalieva R.M.*, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor,

Prorector on Scientific Work and External Relations,

I. Razzakov Kirghiz State Technical University, Bishkek, Kirghiz Republic,

*Makanov K.M.*<sup>1</sup>, Graduate Student,

*Tazhibayev D.K.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,

<sup>1</sup> Institute of Geomechanics and Development of Bowels,

National Academy of Sciences of Kirghiz Republic, Bishkek, Kirghiz Republic.

**Corresponding author:** Tazhibayev K.T., e-mail: kushbak@yandex.ru.

Получена редакцией 29.02.2020; получена после рецензии 02.04.2020; принята к печати 20.08.2020.

Received by the editors 29.02.2020; received after the review 02.04.2020; accepted for printing 20.08.2020.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОМОК И НАРУШЕНИЙ ПО ОСНОВНЫМ УЗЛАМ МЕХАНИЗМОВ ГОРНОЙ ТЕХНИКИ В ООО «НЕРЮНГРИ-МЕТАЛЛИК»

(2020, № 3, СБ 10, 12 с.)

*Дмитриев Андрей Андреевич*<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: aa.dmitriev@s-vfu.ru,

*Шубин Григорий Владимирович*<sup>1</sup> — доцент, *Степанов Егор Тарасович*<sup>1</sup> — магистрант,

<sup>1</sup> Горный институт СВФУ им. М.К. Аммосова.

Экспертизы промышленной безопасности в ООО «Нерюнгри-Металлик» прошли несколько видов технических устройств горного оборудования, которые эксплуатировались на карьере «Гросс». Систематизация и анализ полученных нарушений и дефектов, условно объединенных в группы близких по принципу работы механизмов, позволили выявить наиболее часто встречающиеся нарушения по отдельным типам горных машин (автосамосвалы, бульдозеры, экскаваторы), и наиболее слабые узлы для комплекса всего рассматриваемого горного оборудования. Максимальные ремонтные нагрузки на отечественное и зарубежное оборудование приходится на поломки и нарушения в гидросистемах комплекса горного оборудования.

Ключевые слова; экспертиза, промышленная безопасность, визуальный и измерительный контроль, дефекты, бульдозер, экскаватор, карьерный автосамосвал, полигон.

### SYSTEMATIZATION AND ANALYSIS OF VARIOUS BREAKDOWNS AND VIOLATIONS ON MAIN NODES OF MINING MACHINERY MECHANISMS IN NERYUNGRI-METALLIC LLC

*A.A. Dmitriev*<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: aa.dmitriev@s-vfu.ru,

*G.V. Shubin*<sup>1</sup>, Assistant Professor, *E.T. Stepanov*<sup>1</sup>, Master's Degree Student,

<sup>1</sup> Mining Institute, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 667010, Yakutsk, Russia.

Several types of technical devices of mining equipment that were operated at the gross quarry were examined for industrial safety At Neryungri-Metallic LLC. Systematization and analysis of the various violations and defects obtained from the results of registration, conditionally grouped (blocks) similar to the principle of operation of mechanisms, allowed us to identify the most common violations for certain types of mining machines (dump trucks, bulldozers, excavators), as well as the weakest nodes (blocks) for the complex of all considered mining equipment. Given the complexity of operating mining equipment in harsh climatic, mining and geological conditions, as shown by the analysis, the maximum repair load on both domestic and foreign equipment is due to breakdowns and violations in the hydraulic systems of the complex of various mining equipment considered in the work.

Key words: expertise, industrial safety, visual and measurement control, defects, bulldozer, excavator, dump truck, landfill, severe climatic conditions, temporary roads.