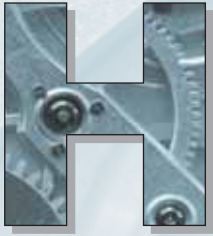


*В предыдущих частях работы был предложен обзор диэлектрических свойств минералов и горных пород в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), рассмотрен механизм термомеханического разрушения в мощных электромагнитных полях СВЧ, необходимое оборудование. В заключительной, третьей, части описаны результаты экспериментального исследования оттаивания мерзлых грунтов, разупрочнения руд и извлечения упорного золота с помощью СВЧ-поля.*

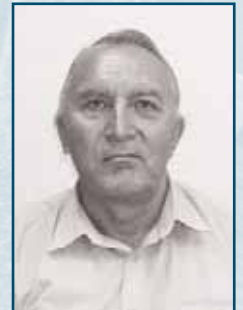
*(Окончание. Начало см. в № 2 (20), с. 35-41 и в № 3 (21), с. 49-55, 2002 г.)*



# НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ: РАЗУПРОЧНЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД МОЩНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СВЧ

*Петров В.М.,*

кандидат физико-математических наук, доцент



## ОТТАИВАНИЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

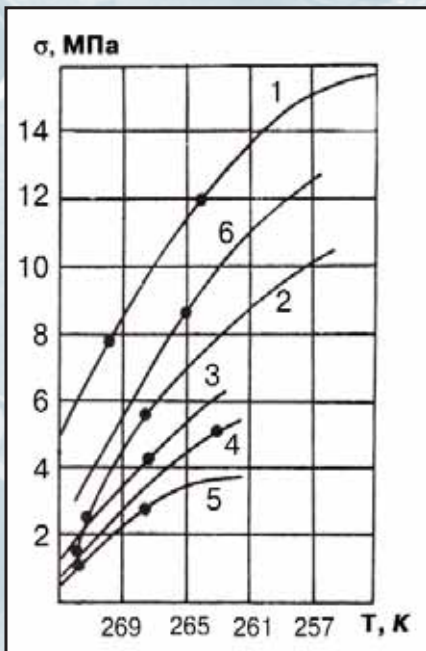
Значительная часть территории России расположена в области вечной мерзлоты. В большинстве же остальных регионов грунт промерзает несколько месяцев в году. Прочность мерзлых грунтов очень высока и растет с понижением температуры, приближаясь к прочности минералов [1] (рис. 1). При динамических нагрузках и температуре минус 30°C сопротивление сжатию мерзлого песка достигает 15 МПа, а мерзлой глины - 75 МПа, что выше, чем у многих горных пород и минералов. Поэтому разработка мерзлых пород в зимнее время обычной землеройной техникой оказывается малоэффективной или вообще невозможной, и ее проводят с предварительным оттаиванием.

Наиболее эффективно оттаивание производится при помощи воздействия мощным электромагнитным полем СВЧ. Поэтому в условиях нашей страны, где поиск и добыча полезных ископаемых сосредоточены в основном на северо-востоке, в условиях вечной мерзлоты, наиболее актуальной оказалась задача разупрочнения полем СВЧ мерзлых грунтов. Работы в этом направлении интенсивно велись до 1990 г. в Якутске под руководством Рябеца Н.И., в Ленинграде и Новосибирске под руководством Некрасова Л.Б. и Мисника Ю.М. и были обобщены в монографиях [2-4].

В 1978-1982 гг. в Ленинградском горном институте создано оборудование для разупрочнения мерзлого грунта при рытье траншей в условиях сезонного промерзания, состоящее из СВЧ-установки (магнетрон М-111 час-

тотой 915 МГц) и землеройной машины. Глубина разработки за один проход составляет 0,3-0,5 м при энергозатратах в 5-6 кВт.ч/м<sup>3</sup>. Там же был создан первый рабочий орган для расширения скважин в мерзлых породах, который разупрочняет породу в стенке скважины направленным потоком СВЧ-поля с последующей отбойкой резцовым инструментом [5]. Источником СВЧ-энергии служил магнетрон М-81 частотой 2,45 ГГц и мощностью 5 кВт. При разработке пород типа мерзлой супеси рабочий орган машины обеспечивал прохождение скважины диаметром 800 мм со скоростью 4-10 м/ч, что на порядок выше обычных установок (0,5 м/ч). Из-за ограниченной мощности имевшихся тогда генераторов рабочий орган оказался не вполне эффективным и не был принят.





**Рис. 1.** Предел прочности мерзлых пород в зависимости от температуры: 1 - песок (влажность 16-17%), 2 - супесь (14-20%), 3 - супесь (21-26%), 4 - глина (43-49%), 5 - пылевая глина с органическими примесями (52-61%), 6 - тяжелые супеси (22-23%)

В Якутском научном центре СО АН (Институт физико-технических проблем Севера, Институт горного дела Севера) и Якутском университете исследовались диэлектрические свойства мерзлых пород в диапазоне СВЧ, проводились теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-оттаивания [2]. При частоте генератора 915 МГц и плотности потока мощности 23 Вт/см<sup>2</sup> оптимальная глубина оттаивания составила 0,25-0,35 м при затратах СВЧ-энергии 30-35 кВт.ч/м<sup>3</sup> (порода - песок и легкая супесь влажностью 10-15% с начальной температурой минус 5°С, время воздействия 3-5 мин). С увеличением длины волны облучения с 33 до 70 см (частота 430 МГц) глубина проникновения СВЧ-поля растет, и глубина оттаивания составляет 0,8 м при плотности потока мощности 10 Вт/см<sup>2</sup> и времени облучения

10 мин. Очевидно, для указанных целей перспективнее еще более длинноволновое излучение.

В Якутске была создана СВЧ-установка для послышной проходки котлованов в мерзлых грунтах глубиной до 1 м на основе магнетрона М-93 производительностью 0,85 м<sup>3</sup>/ч с энергозатратами 30 кВт.ч/м<sup>3</sup>, а также установка для экстренного вскрытия подземных коммуникаций с более мощным магнетроном М-116, обеспечивавшая производительность при ручной выемке оттаявшей породы 0,86-1,57 м<sup>3</sup>/ч в интервале температур от минус 5 до минус 30°С с энергозатратами 12-30 кВт.ч/м<sup>3</sup>. Последняя установка, позволявшая в 2-3 раза снизить себестоимость работ и значительно сократить время ликвидации аварий, прошла приемочные испытания в 1985 г.

Сравнение СВЧ-оттаивания с другими способами подготовки мерзлых пород к экскавации позволило сделать вывод о перспективности этого способа в тех случаях, где требуется скоростное проведение работ: проходка шурфов, экстренное вскрытие при авариях, забивка свай и т.п. Сплошное оттаивание породы в забое из-за высокой энергоемкости может применяться только в случае ограниченного объема выемки или в особых случаях, например, при разведке месторождений. Для снижения удельных энергозатрат при разработке новых землеройных и шурфопроходческих машин следует использовать генераторы метрового диапазона с выходной мощностью 100 кВт и выше, которые сегодня реально имеются. Поэтому работы по разупрочнению мерзлых пород СВЧ-полем могут быть продолжены на современном техническом уровне.

#### РАЗУПРОЧНЕНИЕ РУД

Комплексные теоретические и экспериментальные исследования процессов управления прочностными свойствами горных пород, включая разупрочнение

СВЧ-полем, проводились в Московском горном институте [6, 7]. Экспериментально испытывались железистые кварциты, содержащие около 45% магнетита, 10% гематита и 45% кварца. Образцы размерами 15x15x30 мм<sup>3</sup> облучались от генератора частотой 2,45 ГГц мощностью 0,5 кВт, изучались их помол и обогащение.

Из-за небольшой мощности СВЧ-генератора нагревание образца было медленным - до 200°С за 50 с, 450°С за 3 мин и до 900°С за 10 мин. При нагреве до красного каления наблюдалось взрывное разрушение - от образцов отделялись кусочки, граница которых, как правило, проходила по рудным слоям. Такое разрушение обусловлено наличием в породе большого количества связанной воды и ее испарением. При охлаждении раскаленных образцов в воде трещинообразование идет быстрее и часто приводит к их разрушению. Согласно проведенным расчетам при повышении температуры на 1 К в зернах магнетита должны возникать растягивающие термомеханические напряжения до 0,17-0,23 МПа, в зернах гематита до 0,35-0,40 МПа, а в кварце сжимающие напряжения 0,21-0,27 МПа. При скачке температуры на 100 К напряжения должны превысить предел прочности минералов и тогда произойдет растрескивание. Появление трещин, идущих в основном по границам зерен, подтверждается структурными исследованиями обработанной руды. Трещинообразование в кварце начинается при более низких температурах, чем в рудных минералах. Это свойство следует учитывать при выборе оптимального режима СВЧ-разупрочнения для сохранения цельными зерна магнетита и гематита.

Помол и ситовой анализ образцов, обработанных СВЧ-полем, дали следующие результаты. Выход готового класса -0,074 мм



до 85% в первой стадии измельчения руды, обработанной в течение 50 с, достигается за 20 мин, а необработанной - за 40 мин. После более длительной СВЧ-обработки (10 мин) выход готового класса -0,074 мм достигается менее чем за 20 мин помола. Это свидетельствует о разупрочнении руды СВЧ-нагревом и об уменьшении энергоемкости при измельчении.

Обогащение проб магнитной сепарацией в сильном магнитном поле выявило повышение качества концентрата при СВЧ-обработке по сравнению с необработанной рудой. На 11,6% увеличился выход концентрата и на 12,5% извлечение железа. При этом наибольший эффект достигается на образцах, нагретых до 200, а не до 900°C. Следовательно, работы [6, 7] убедительно доказали необходимость подбора своего оптимального режима СВЧ-обработки для каждого конкретного вида горной породы, если мы имеем целью не только получить необходимые изменения ее параметров при минимуме энергозатрат, но и улучшить дальнейшую переработку. Случайно взятый режим воздействия СВЧ-полем (частота, мощность, длитель-

ность) может не дать положительного результата.

В книге [8] обсуждаемой теме посвящена одна из глав. По приведенным расчетам для разрушения прочных пород типа гранита или известняка в стоячей электромагнитной волне мощность генератора должна быть не менее 50 кВт. При этом энергоемкость разрушения составит 3-7 МДж/м<sup>3</sup>, а производительность - до 30 м<sup>3</sup>/ч. Энергоемкость для пород типа песчаника, содержащих не менее 1% влаги, значительно ниже, так как пары воды создают в закрытых трещинах и порах давление до 20 МПа. Рассмотрена отбойка горных пород полем СВЧ, направляемым излучателем. Производительность отбойки растет пропорционально квадрату излучаемой мощности, а энергоемкость уменьшается пропорционально мощности. Отбойка с применением СВЧ-поля наиболее эффективна в случае работы с породами высокой прочности.

Отметим, что во всех перечисленных работах (как, впрочем, и в последующих) используются генераторы СВЧ недостаточной мощности, которые не могут обеспечить режим резкого и неоднородного адиабатическо-

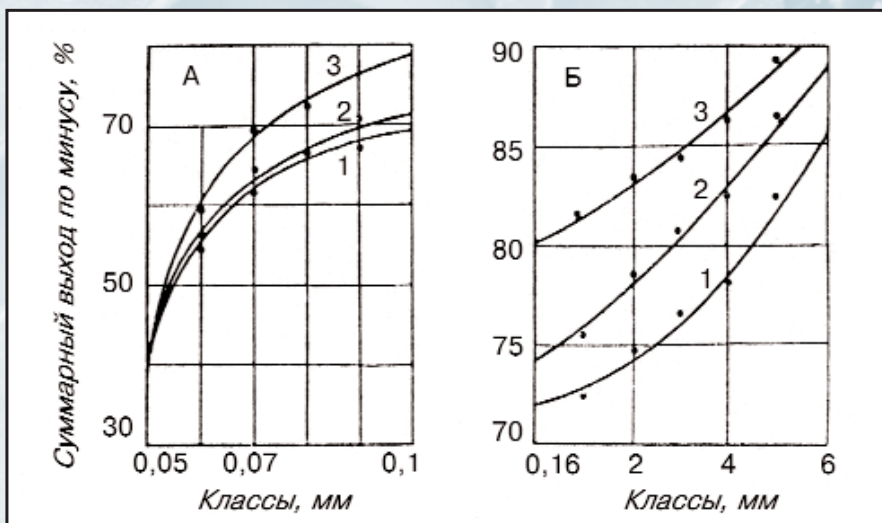
го нагрева многофазных сред. Режим же медленного нагрева, при котором температура успевает выровняться по зернам разных минералов, не является оптимальным как с точки зрения получения максимальных разрушающих напряжений, так и минимизации энергозатрат и раскрываемости добываемого минерала (см. вторую часть настоящего обзора).

В Институте геотехнической механики (ИГТМ) АН УССР (г. Днепропетровск) совместно с Днепропетровским горным институтом и Днепропетровским университетом до 1991 г. велись интенсивные разработки технологии и аппаратуры для разупрочнения горных пород СВЧ-полем [9-15] и эксперименты в этом направлении [16-20]. Испытывалась главным образом железная руда Криворожского бассейна.

В [16] измерена прочность железной руды при нагреве СВЧ-полем и установлено ее значительное снижение. Сделан вывод о возможности использования электромагнитной энергии СВЧ для разупрочнения пород перед их механическим разрушением.

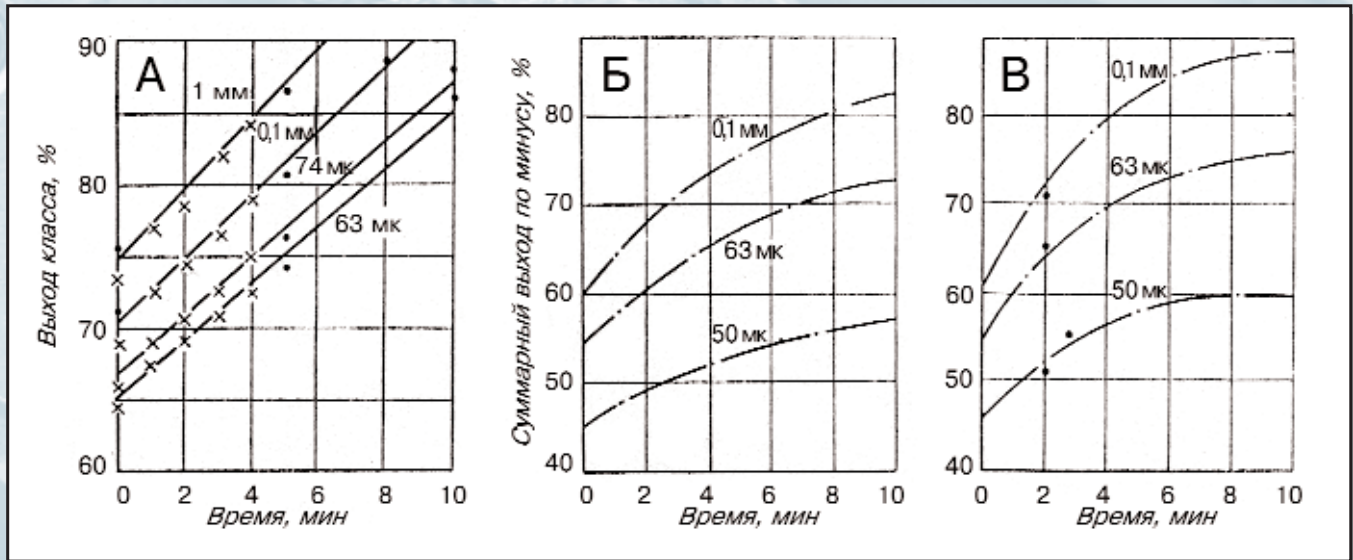
В [17, 18] измерены диэлектрические и магнитные параметры ряда горных пород в диапазоне СВЧ. Магнетитовые руды обладают высоким поглощением энергии СВЧ, линейно связанным с содержанием магнетита. Значительный (хотя и не основной) вклад в поглощение на частотах 915 и 2375 МГц вносят магнитные потери. При облучении СВЧ-полем 2,5 кВт некоторые породы (песчаник, окисленная гематитовая руда, магнетитовый роговик) разрушаются без дополнительного наложения механических нагрузок.

В [19] проведены эксперименты по измельчению и ситовому анализу проб железных руд, нагреваемых СВЧ-полем до 300°C (плотность потока мощности 35-60 Вт/см<sup>2</sup>, время облучения 3 мин), нагреваемых в муфельной



**Рис. 2.** Характеристики продуктов измельчения необработанной руды (1), руды после отжига в печи при 300 °С (2) и после СВЧ-нагрева до 300 °С (3)





**Рис. 3.** Зависимость выхода мелких классов от времени обработки руды в поле СВЧ при плотности потока мощности 35 Вт/см<sup>2</sup> (А), 40 Вт/см<sup>2</sup> (Б) и 60 Вт/см<sup>2</sup> (В)

печи до той же температуры и не подвергнутых тепловой обработке. Оказалось, что в продукте измельчения руды, нагретой в печи, по сравнению с контрольным образцом выход классов мельче - 0,1 мм существенно не изменился (рис. 2А, кривые 2, 1), тогда как в нагретой СВЧ-полем их содержание возросло (кривые 3, 1). Так, выход класса -0,074 мм увеличился на 6-10%. Крупные классы руды, нагретой в печи (рис. 2Б, кривая 2), оказались размолоты более эффективно - в них возросло содержание средних фракций. При СВЧ-нагреве до той же температуры это различие проявляется в большей мере (кривые 3, 1). Аналогичные зависимости были получены и на пробах руды, нагревавшихся до других температур - от 80 до 450°С. Выявленные преимущества СВЧ-нагрева по сравнению с печным связываются с селективностью воздействия СВЧ-поля на минералы и раскрытием зерен по плоскостям спайности.

Измельчение руды, обработанной СВЧ-полем в разных режимах, показало, что с увеличением времени воздействия содержание классов мельче -0,16 мм в продукте измельчения зако-

номерно возрастает (рис. 3). При этом для контрольного и обработанного продуктов различие по классу -0,074 мм достигает 25%. Наиболее полное раскрытие для данной породы достигается в классе -0,05 мм, что подтверждено данными, полученными при изучении под микроскопом. Обработка руды в потоке СВЧ-мощности 35 Вт/см<sup>2</sup> в течение 1-10 мин позволяет повысить производительность мельницы по крупности 10-0 мм на 60%. Увеличение потока мощности дает возможность достичь тех же результатов при меньшем времени обработки (рис. 3Б, В).

В работе [20] изучалось измельчение железной руды, нагретой СВЧ-полем и резко (в воде) или медленно (на воздухе) охлажденной. Ситовой анализ показал, что СВЧ-обработка и охлаждение способствуют повышению выхода мелких классов как при сухом (рис. 4, кривые 1, 2), так и мокром помоле (кривые 3, 4). В обоих случаях выход готового класса увеличился на 10% (погрешность ситового анализа 2-3%). Независимо от способа охлаждения и измельчения равные затраты энергии СВЧ давали одинаковое про-

центное увеличение выхода мелких классов.

На выход крупных фракций продуктов измельчения при сухом помоле цикл "СВЧ-нагрев - охлаждение" практически не влияет (рис. 4Б, кривые 1, 2). При мокром же измельчении наблюдается заметное уменьшение выходов крупных классов (кривые 3, 4). Высокая скорость охлаждения в воде приводит к росту термоупругих напряжений, тепловому удару, который и повышает измельчение крупных фракций.

Согласно [20] обработка руды перед измельчением электромагнитным полем СВЧ позволяет повысить производительность промышленных шаровых мельниц на 10-15%, если используется издробленная рудная масса. При нагреве крупных частиц в поле СВЧ и резком охлаждении их в воде производительность мельниц может быть повышена на 5-7%. Подчеркнем, что речь здесь идет о режиме медленного нагрева.

В ИГТМ предложен оригинальный способ разрушения горных пород путем облучения двумя генераторами СВЧ [9]. Сначала массив породы облучают волнами меньшей энергетической плотно-



сти (150-300 Вт/см<sup>2</sup>) от генератора 1 до образования теплового следа, а затем - волнами большей плотности (300-5000 Вт/см<sup>2</sup>) от генератора 2, идущими в перпендикулярном направлении (рис. 5). Первое облучение создает в породе 3 нагретую зону 4 с повышенным значением мнимой составляющей диэлектрической проницаемости. Для излучения генератора 2 эта зона является сильно поглощающей, тогда как ненагретая порода - радиопрозрачной. В результате мощность генератора 2 поглощается в основном в зоне пересечения облучений 5. Резкий нагрев зоны 5 приводит к тепловому расширению, фазовым превращениям, образованию газовой фазы и т.д. в этой области, что ведет к разрушению породы. Перемещая антенну генератора 2 над поверхностью массива вдоль теплового следа 4, можно создавать канал разрушенной породы или резать ее. Этим способом разрушались кристаллические сланцы, амфиболиты, габбро-диабазы, граниты, песчаники и другие породы с использованием генераторов на частоте 2,4 ГГц. Объем разрушае-

мой породы в секунду составлял 180-250 см<sup>3</sup>.

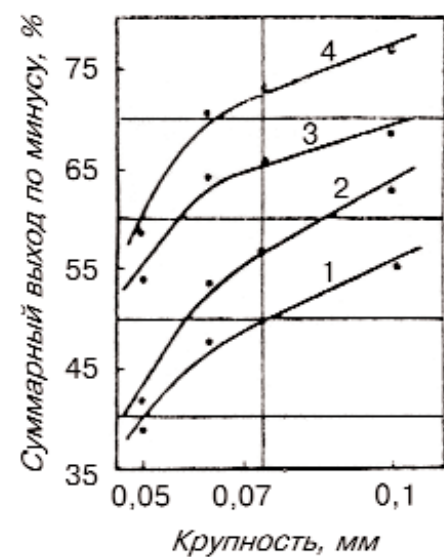
Аналогичные теоретические [21, 22] и экспериментальные исследования [23-29] до 1991 г. проводились в Институте горного дела им. А.А. Скочинского (г. Люберцы, Моск. обл.).

В [23] изучалось разрушение песчаника СВЧ-полем. При облучении плотностью 300 Вт/см<sup>2</sup> разрушение массива происходит в виде периодического отделения шелушек толщиной 2-4 см. С увеличением плотности потока мощности толщина шелушек уменьшается, а частота выколов растет. При плотностях 1000-3000 Вт/см<sup>2</sup> на образцах крепких песчаников с влажностью от 0,1 до 2% наблюдалось объемное взрывное разрушение. Влажность существенно влияет как на энергоемкость взрывного разрушения, так и на критическую плотность потока СВЧ-энергии. В момент, непосредственно предшествующий взрыву, влага поглощает около 100 кВт мощности на 1 г своей

массы, что и создает разрушающие давления.

Взрывное разрушение различных песчаников и бетонов СВЧ-полем от генератора мощностью 50 кВт при плотности излучения 500 Вт/см<sup>2</sup> изучалось и в [24]. При перемещении луча в блоке песчаника образуется щель глубиной 5-20 см. Энергоемкость процесса составила 80-200 кВт.ч/м<sup>3</sup>.

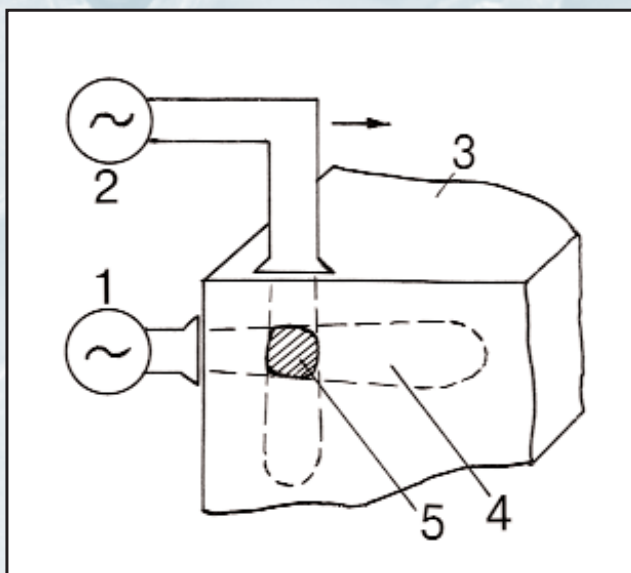
Разрушение



**Рис. 4.** Гранулометрические характеристики продуктов измельчения железной руды ИнГО-Ка: 1 - сухое измельчение без воздействия поля СВЧ, 2 - с полем, 3 - мокрое измельчение без поля, 4 - с полем СВЧ

крепких песчаников при облучении миллиметровыми волнами (3,5 мм) с потоком импульсной энергии до 40 кВт/см<sup>2</sup> и длительностью импульсов до 30 мс описано в [25]. Энергоемкость процесса разрушения при больших плотностях энергии составляет 240-250 Дж/см<sup>3</sup>, тогда как при меньших (несколько кВт/см<sup>2</sup>) - 360-700 Дж/см<sup>3</sup>. Следовательно, адиабатический режим нагрева большой мощностью позволяет существенно снизить энергоемкость СВЧ-разрушения. При плотности СВЧ-поля в 20-40 кВт/см<sup>2</sup> у поверхности облучаемой породы возникает электрический пробой, что препятствует дальнейшему повышению мощности. В [26] рассмотрена возможность практического использования этого явления - комбинированное плазменно-волновое разрушение.

В [27] изучалось комбинированное механическое и СВЧ-разрушение горной породы путем вдавливания индентора, на кото-



**Рис. 5.** Экономичный способ создания разрушенных каналов в горных породах двумя генераторами СВЧ по [9]



рый подавалось СВЧ-напряжение. Получены зависимости "нагрузка - деформация" для различных мощностей подводимого СВЧ-излучения.

В ИГД был разработан резец для термомеханического разрушения горных пород при бурении скважин [28]. Внутри режущего инструмента размещен объемный СВЧ-резонатор, к которому через волновод подводится энергия генератора. Открытый конец резонатора направлен в породу, обеспечивая нагрев и разупрочнение перед режущей кромкой. Резонатор обеспечивает хорошее согласование генератора с породой, как показано в [29].

После пионерских работ советских ученых по разрушению горных пород СВЧ-полем, к этой проблеме проявили интерес специалисты Австралии [30], США и Канады.

В [31] патентуется ранее известный в России способ срезания пласта твердых пород прочностью свыше 170 МПа (например, карбид вольфрама) путем облучения породы перед режущим инструментом СВЧ-полем. В результате термомеханических напряжений в породе образуются микротрещины и разрывы, что приводит к снижению суммарных энергозатрат. Экспериментальных данных, подтверждающих патент, не приводится.

В патенте [32] фирмы EMR Microwave Technology Corporation предлагается обрабатывать руду или концентрат путем просыпания через прямоугольный СВЧ-резонатор в области пучности его электрического поля, как это делалось ранее в нашей стране. Предпочтительная мощность генератора 10-50 кВт, частота 915 или 2450 МГц. Добротность резонатора должна быть в пределах 1000-25000 (предпочтительно 20000), что едва ли достижимо практически. При указанных параметрах установки время обработки должно составить не более

6 с, в идеале 0,25 с. Экспериментального подтверждения не приводится.

В [33] исследовался помол железных руд после обработки в СВЧ-поле. Образцы руды размерами 3 см содержали гематит, магнетит и гетит. Генератор мощностью 3 кВт и частотой 2450 МГц позволял нагревать их до температуры 940°C. С помощью сканирующего электронного микроскопа изучалось изменение микроструктуры образцов при их обработке, а также проводился помол и ситовой анализ по методике Бонда [34]. На микрофотографиях образцов, обработанных СВЧ-полем, видны микротрещины по границам зерен. Отмечается снижение энергозатрат на помол на 3 кВт.ч/т и облегчение дальнейшей сепарации. Однако экономия энергии на помол не компенсирует ее затрат на нагрев. При увеличении мощности магнетрона до 6 кВт энергозатраты на нагрев уменьшаются при той же экономии на помол [35]. В распоряжении авторов не было более мощных генераторов, которые могли бы снизить суммарные энергозатраты на СВЧ-обработку и помол по сравнению с помолом без обработки.

В упоминавшейся теоретической работе [36] правильность расчета СВЧ-нагрева руд проверялась экспериментом с искусственным композитом, содержащим кварц и 1-7% поглощающего халькопирита. Композит нагревался в СВЧ-печи мощностью 1 кВт в течение 120 с. Выяснено, что поглощаемая энергия линейно растет с увеличением содержания халькопирита, а также с увеличением размера его частиц, достигая максимума в районе 0,4 мм. Здесь же дан энергетический анализ СВЧ-разупрочнения. Если обрабатываемая руда содержит 2,5% массы поглощающего минерала (например пирита), а создаваемые в ней термомеханические напряжения равны 50 МПа (скачок температуры на 200

К), то расход СВЧ-энергии при импульсном режиме обработки составит всего 0,8 кВт.ч на тонну породы.

В 1998 г. нами с Лысовым Г.В. были проведены предварительные эксперименты по обработке железной руды мегаваттными импульсами СВЧ. При облучении дробленой породы импульсами миллиметровых волн (150 ГГц) мощностью 0,5 МВт и длительностью 1 мс наблюдалось оплавление кусочков без их разрушения. Это связано с очень малой глубиной проникновения миллиметровых волн в проводящие среды. На более низких частотах (10-сантиметровый диапазон) использовался генератор мощностью 6,5 МВт с длительностью импульсов от 3 до 14 мкс. Дробленая руда засыпалась в волновод через отверстие в широкой стенке. Наблюдался неоднородный нагрев кусочков. Однако между кусочками породы и кусочками и стенками волновода происходили разряды, приводящие к потерям СВЧ-энергии. Опыты позволили сделать заключение о необходимости использования на практике непрерывных генераторов мощностью 0.1-1 МВт частотой ниже 2,45 ГГц, получая нужные длительности воздействия (порядка 1 мс) путем просыпания потока породы через поле СВЧ. Опыты с обработкой пирита в СВЧ-печи непрерывной мощностью 6 кВт подтвердили известные результаты, а именно: при нагреве в течение 10 с и более из руды выделяется сернистый газ, она вспенивается и значительно разупрочняется.

В последнее время к СВЧ-обработке горных пород подключился Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца [37]. В институте имеются мощные генераторы метрового диапазона волн на основе триодных усилителей (лампы ГИ-66А) с КПД около 50%. В непрерывном режиме мощность достигает 14 кВт, а в импульсном 200 кВт при



регулируемой длительности импульсов до десятков миллисекунд. Проведены лишь пробные эксперименты с высоким уровнем мощности.

### ИЗВЛЕЧЕНИЕ УПОРНОГО ЗОЛОТА

Многолетняя интенсивная добыча золота из богатых (до 300 г/т) россыпей привела к их истощению. Начинается освоение золотоносных руд в коренных месторождениях (где содержится всего 5-15 г драгоценного металла в тонне породы), а также промежуточных продуктов свинцово-цинкового, медного, уранового и некоторых других с содержанием 0,5-3 г/т. В ряде стран, преимущественно в ЮАР и России, необходимо вторично перерабатывать хвосты старых разработок (1-3 г/т золота и больше), занимающих огромные площади ценных земель и негативно влияющих на экологическую обстановку.

Однако добыча драгметалла из указанных выше новых видов сырья проблематична. Помимо низкого процента содержания золота, оно еще и "упорно", его трудно извлекать. Дело в том, что частицы золота в таком сырье имеют размер от сотых до десятых долей микрометра и связаны с другими минералами, главным образом с пиритом ( $\text{FeS}_2$ ) и арсенопиритом ( $\text{FeAsS}$ ). Поэтому они не извлекаются раствором цианида ( $\text{NaCN}$ ), обычно применяемым в таких случаях. Для извлечения упорного золота необходимо перед цианированием предварительно "вскрыть" или разрушить оболочку сульфидов. Существующие технологии добычи из коренных руд предполагают для вскрытия окислительный обжиг, автоклавное выщелачивание, бактериальное окисление. Эти методы позволяют извлекать до 92-97% золота, но требуют значительных капиталозатрат, энергоемки и неэкологичны. Поэтому ведется разработка новых энер-

госберегающих и экологически безопасных методов извлечения упорного золота. Предположительно, расколоть сульфидную скорлупу "орешка" и извлечь из нее "золотое ядро" должен "молот" в виде электромагнитного импульса [38]. Минералы типа пирита и арсенопирита, в которые "замурованы" частички благородного металла, очень сильно поглощают поле СВЧ и нагреваются этим полем до более высоких температур, нежели окружающая порода. Поэтому при воздействии СВЧ-импульса происходит резкий нагрев и растрескивание сульфидной оболочки, в результате металл становится доступным для извлечения растворами. СВЧ-обработка позволяет повысить степень раскрытия, увеличить извлечение драгметаллов, использовать для их добычи упорные и бедные породы. Кроме того, при СВЧ-обработке не обязателен тонкий помол концентрата до десятков микрометров, достаточно измельчения до 0,5-2 мм.

Работы по извлечению упорного золота с помощью СВЧ-поля были начаты в Канаде [39]. Исследовались концентраты золотоносной руды из Онтарио, в которых золото связано с пиритом и арсенопиритом. Для облучения использовались 6 магнетронов по 1 кВт каждый. Максимальное время облучения составляло 15 мин. Масса помещаемой при облучении в кварцевую кювету навески - 500 г. СВЧ-нагрев сопровождался выделением паров  $\text{SO}_2$  и  $\text{As}_2\text{O}_3$  и потерей массы навески. Если при

обычном нагреве концентрат начинает разлагаться при температуре  $550^\circ\text{C}$ , то при СВЧ - уже при  $420^\circ\text{C}$ . Экстракция золота и серебра методом цианирования растет в зависимости от СВЧ-мощности (рис. 6). Фактически полное извлечение золота (98%) происходит при мощностях 5-6 кВт.

Другой опыт: 100 г концентрата облучали мощностью 6 кВт в разное время - от 5 до 16 мин (табл. 1). Здесь 98% золота и 60% серебра извлекалось после обработки в течение 13-16 минут.

Хотя режим обработки не был отработан, необходимое для извлечения время СВЧ-нагрева оказалось много меньше, чем при обычном нагреве (2-2,5 ч). Достоинство СВЧ-метода состоит в возможности использовать более крупные частицы породы - до 2 мм.

Эти работы ведутся исследовательской фирмой EMR Microwave Technology Corp. [40], где отмечают, что применение СВЧ-поля позволяет снизить расходы на подготовку упорных пород к цианированию. Так, при обработке 200 т концентрата в день СВЧ-полем расходы составляют \$3,84 млн., тогда как при обычном обжиге - \$6,9 млн., при

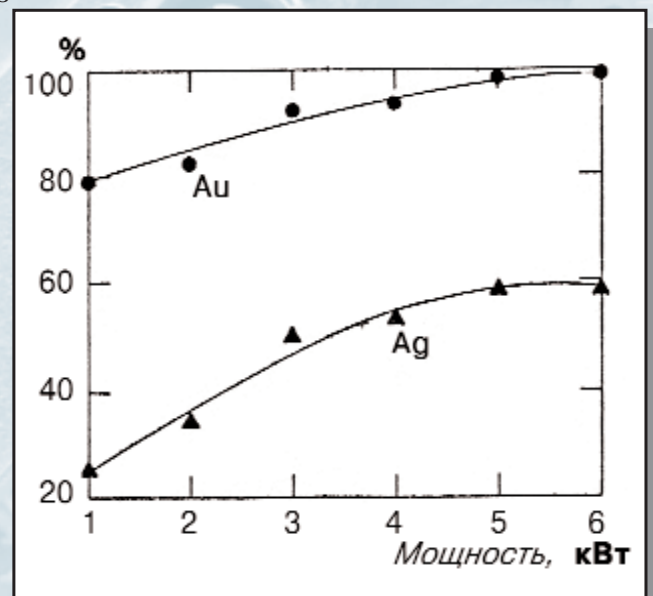


Рис. 6. Извлечение золота в зависимости от мощности СВЧ-облучения



**Таблица 1.** Извлечение золота и серебра из концентрата, облученного разное время СВЧ-полем 6 кВт по [39]:

Время облучения, мин	Потери массы, %	Извлечение, %	
		Au	Ag
5	1,6	75	34
8	10,2	89	45
12	13,2	97	56
13	17,0	98	59
16	20,1	98	60

окисления под высоким давлением - \$26,5 млн., бактериальном окислении - \$3,0-3,7 млн. Кроме того, не требуется высоких температур и давлений. Если из необработанных карбонатных руд методом цианирования извлекается только 5% металла, то из обработанных СВЧ-полем - 83%. Из мексиканской золотоносной руды (гетит, кальцит, кварц, ярозит) методом цианидного выщелачивания извлекается 50% золота, а после СВЧ-обработки - все 100%. Селективное окисление сульфидов СВЧ-полем может быть использовано и при извлечении других металлов.

Аналогичные исследования по извлечению упорного золота СВЧ-полем проведены Институтом ядерной физики и Институтом геологии и геофизики АН Узбекистана (г. Ташкент) [41]. Изучались сульфидные золотосодержащие руды и хвосты обогатительных предприятий. Пробы руды месторождения Марджанбулак содержат 165-256 г/т золота в сростках с кварцем и сульфидами или гидрооксидами железа и 718-2787 г/т серебра. Хвосты обогатительной фабрики Навойского горно-металлургического комбината (НГМК) содержат арсенопирит, шеелит, циркон и 4,8 г/т золота, связанного с селенсо-

держащим арсенопиритом. Основными рудными минералами хвостов Чадакской золотоизвлекающей фабрики (ЧЗИФ) являются пирит, кварц, карбонаты. Золото (0,1 г/т) находится в виде зерен размером 0,004-0,2 мм в кварце и в серициткварцевой породе. Для облучения использовалась СВЧ-печь с генератором частотой 2,45 ГГц и регулируемой мощностью от 0,1 до 0,6 кВт.

Нагрев СВЧ-полем вызывал появление в породе термических напряжений, образование межзерновой и внутризерновой микротрещиноватости. Из породы удалялась адсорбционная и химически связанная вода, возгорались сера и мышьяк, разлагался гидрогематит с образованием магнетита и шли другие физико-химические реакции.

Извлечение золота выщелачиванием из сульфидно-кварцевой пробы месторождения Марджанбулак повысилось с 60 до 92% при СВЧ-нагреве до 300°C, а окисленной руды того же месторождения - с 84 до 99% при нагреве до 1000°C. Извлечение магнитной сепарацией из хвостов НГМК в результате СВЧ-облучения составило 85%, а из хвостов ЧЗИФ увеличилось в 10 раз.

СВЧ-воздействие на упорный золотосодержащий концентрат

исследовалось также в Институте комплексного освоения недр РАН совместно с другими институтами [42, 43]. В эксперименте [42] использовался гравитационный концентрат, полученный при обогащении золотосодержащих руд уральского месторождения. Основные рудные минералы концентрата - это сульфиды (пирит и др.), а породообразующие - карбонаты и кварц. Содержание золота - 53,2 г/т, серебра - 63,8 г/т. Большая часть золота (до 85%) находится в виде свободных золотин, поддающихся цианированию. Извлечение же остальных 15% упорного золота сопряжено с необходимостью разупрочнения и разрушения тех компонентов (сульфиды, кварциты, карбонаты), в которых оно находится в тонкодисперсном состоянии. Эксперимент подтвердил, что СВЧ-обработка позволяет вскрыть эти тонкодисперсные вкрапления и сделать их доступными для цианистого раствора. Извлечение золота из концентрата по схеме "СВЧ-прокаливание до 360°C - цианирование" составило 94,8%, что на 8,3% выше по сравнению с контрольной пробой, не прошедшей СВЧ-обработки.

В [43] обработку золотосодержащего сырья вели короткими электромагнитными импульсами, спектр которых охватывает диапазон СВЧ. Использовалась упорная золото- и серебросодержащая руда Неждановского месторождения, в которой золото представлено как самородным металлом, так и ассоциированным с арсенопиритом и пиритом (до 45%). Серебро в основном тонкое и тонкодисперсное и более чем на 70% связано с сульфидами. Свободно цианируемые золото и серебро составляют соответственно 51 и 22%. Навески руды массой 50 г были с размерами частиц -50 или -500 мкм. Обработку осуществляли в зазоре 8 мм периодическими наносекундными импульсами с частотой повторения 50 Гц и напряженностью поля поряд-

**Таблица 2.** Воздействие мощных импульсов на извлечение золота и серебра (%) цианированием из упорного гравитационного концентрата по [43]:

Число импульсов	-50 мкм		-500 мкм	
	Au	Ag	Au	Ag
0	77,0	43,16	51,22	21,80
17500	80,64	76,29	70,66	42,09
25000	83,96	68,72	81,75	65,53
37500	83,40	73,66	82,30	68,85



**Таблица 3.** Извлечение золота из упорных пиритовых хвостов после их обработки в водной пульпе наносекундными импульсами по [44]:

Число импульсов	Время обработки, с	Извлечение золота, %	Энергозатраты по пириту, кВт.ч/т	Энергозатраты по золоту, кВт.ч/т
0	0	17	0	0
1500	5	37,3	0,8	1,9
3000	10	50,9	1,7	2,2
4500	15	70,9	2,5	2,1
6000	20	81,2	3,3	2,4
7500	25	87,1	4,2	2,7

волит улучшить экологию районов переработки руд.

Механизм наносекундного пробоя неоднородных сред типа руды

ка 10 МВ/м, превышающей пробивную в статическом поле.

Данные об извлечении золота и серебра при обработке разным числом импульсов представлены в табл. 2. Суммарное извлечение благородных металлов при обработке растет. Это говорит об эффективности вскрытия упорной породы, разрушении минеральных комплексов и создании видеоимпульсами каналов пробоя, обеспечивающих доступ продуктивного раствора к частицам металла. Кроме того, опыт показал хорошее извлечение металлов из обработанной руды с размерами частиц -500 мкм, близкое к показателям класса -50 мкм, что позволяет снизить энергозатраты на помол с класса -500 до -50 мкм, составляющие более 20 кВт.ч/т.

Академик Чантурия В.А. с соавторами [43] делают выводы о перспективности импульсной обработки и необходимости дальнейших целенаправленных исследований влияния напряженности поля на условия образования и свойства микроканалов пробоя, влияния частоты следования импульсов, их длительности и формы, сравнение эффективности и энергозатрат при обработке видео- и радиоимпульсами. В результате подобных исследований может быть создана принципиально новая энергосберегающая технология рудоподготовки и исключена необходимость вложения средств в энергоемкий и экологически опасный процесс окислительного обжига или дорогостоящую автоклавную технологию вскрытия концент-

ратов. С помощью импульсов можно извлекать не только серебро и золото, но и никель, кобальт и другие металлы.

В Институте электрофизики УО РАН совместно с Институтом горного дела УО РАН (г. Екатеринбург) проводились аналогичные эксперименты по обработке золотоносных руд короткими видеоимпульсами [44]. Использовался порошок пирита из рудных хвостов Учалинского ГОК с крупностью -74 мкм, содержащий упорное золото в количестве 2,2 г/т. В отличие от предыдущей работы, обработка осуществлялась в воде при массовом соотношении вода - пирит 1:1. Установка давала импульсы амплитудой до 250 кВ длительностью менее 20 нс с энергией 1 Дж и частотой повторения 300 Гц. Пульпа протекала через зону обработки с регулируемой скоростью. Производительность экспериментальной установки - 90 кг породы в час.

В результате обработки породы электрическими импульсами увеличилась удельная поверхность частиц, и они стали иметь более строгую огранку, так как произошло разрушение сростков. Извлекаемость золота цианированием возросла на 70% (табл. 3). Затраты энергии на 1 г золота составили около 2 кВт.ч. При этом в воде пульпы оказались растворенными содержащиеся в породе медь (0,8 г/л), цинк (1 г/л) и железо (2 г/л). Извлечение меди и цинка из пульпы может оказаться экономически выгодным, а комплексная переработка отвальных хвостов поз-

или пульпы практически не изучен [45]. Поэтому нет сомнения, что при дальнейшем проведении исследований по воздействию наносекундных видео- и радиоимпульсов на горные породы экономические показатели извлечения металлов могут быть значительно улучшены.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты вышеизложенных экспериментальных работ подтвердили предсказываемое разупрочнение руд мощным СВЧ-полем и возможность снижения расходов на разрушение и измельчение горных пород. Подтвержден и факт повышенного извлечения золота и других ценных металлов из бедного и упорного сырья. Электромагнитные волны радиочастотного диапазона, применявшиеся со времен А.С. Попова в основном для связи, могут произвести революцию в горном деле. Новое направление радиоэлектроники поможет справиться с задачами по снижению энергозатрат в горной промышленности, по комплексной переработке накопившихся отходов и отвалов горно-обогатительных предприятий и в деле защиты окружающей среды.

Эффективность воздействия СВЧ-поля на горные породы растет с увеличением мощности излучения, а затраты на обработку падают. Поэтому очевидна необходимость использования генераторов СВЧ мощностью 100-1000 кВт в непрерывном



режиме и до гига watt в импульсном. Такие источники в России имеются. В России же впервые начаты работы по применению СВЧ в горном деле. Продолжают существовать НИИ, КБ и опытные производства, способные реализовать в металле сверхмощные не только экспериментальные, но и промышленные установки. Поэтому Россия могла бы стать поставщиком подобных установок на мировом рынке. Однако работы в этом направлении после 1991 г. не финансируются, так как заинтересованные горнообогатительные предприятия ссылаются на то, что это работа исследовательская, а госструктуры недооценивают всей важности проблемы.

В стране созданы новые генераторы СВЧ - варкаторы гига wattной мощности в режиме наносекундных импульсов. Разрушающее действие их полей на горные породы должно быть наиболее интенсивным, а пробой воздушных прослоек затруднен. Поэтому неотложно требуется провести исследование по разрушению руд и раскрытию находящихся в них металлов с помощью варкаторов. Необходимо исследовать механизм разрушения руд наносекундными импульсами с напряженностью выше пробивной. Нужно провести ряд экспериментов по обработке руд СВЧ-полем в различных газовых и жидких средах и исследование происходящих при этом стимулируемых излучением химических реакций, что может выявить новые методы разделения и извлечения металлов из полиметаллических руд. Напрашивается также создание установок с индукционным нагревом проводящих и магнитных руд волнами метрового диапазона, которые могут оказаться более производительными, экономичными и перспективными для промышленного применения.

Диэлектрические свойства минералов и горных пород в диа-

пазоне СВЧ изучались в основном неспециалистами и на кустарных установках, где точность измерений была мала, а надежность часто нулевая. Свойства многих минералов вообще не изучались. Не снимались и очень важные для практики температурные зависимости диэлектрических параметров. Поэтому весьма актуально проведение специальной работы по исследованию диэлектрических характеристик в диапазоне СВЧ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Цытович Н.А. *Механика мерзлых грунтов*. М., Высшая школа, 1973.
2. Рябец Н.И. *Основы разупрочнения и оттаивания мерзлых пород СВЧ-энергией*. Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1991.
3. Некрасов Л.Б. *Основы электротермомеханического разрушения мерзлых пород*. Новосибирск, Наука, 1979.
4. Мисник Ю.М. *Основы разупрочнения мерзлых пород СВЧ-полями*. Ленинград, ЛГУ, 1982.
5. Мисник Ю.М. и др. *Машины электротермомеханического действия*. Колыма, 1973.
6. Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г. *Управление свойствами пород в процессах горного производства*. М., Недра, 1994.
7. Зецер Ю.И. и др. *Применение СВЧ-нагрева для рудоподготовки железистых кварцитов Михайловского горно-обогатительного комбината перед их обогащением*. Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Тезисы докл., Саратов, 1991, 98-100.
8. Емелин М.А. и др. *Новые методы разрушения горных пород*. М., Недра, 1990, 49-55.
9. Москалев А.Н. и др. *Способ разрушения горных пород электромагнитными волнами*. Авт. св. СССР № 724731, кл. E21C 37/18, 1977.

10. Москалев А.Н. и др. *Устройство для СВЧ-обработки сыпучих материалов*. Авт. св. СССР № 1592958, кл. H05B 6/64, 1988.

11. Явтушенко О.В., Коробской В.К., Прудкий В.П. *Сверхвысокочастотное электротермомеханическое буровое устройство*. Сб. "Механика и разрушение горных пород", вып. 3. Киев, 1975, 209-211.

12. Москалев А.Н. и др. *Порогоразрушающее ЭТМ-устройство с СВЧ-экраном на основе заграждающих структур*. Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород". Киев, Наукова думка, 1976, 103-105.

13. Чельшикина В.В., Коробской В.К. *Разработка технологии разупрочнения композиционных материалов в электромагнитных полях СВЧ*. Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Тез. докл. Саратов, 1991, 51-52.

14. Явтушенко О.В. и др. *Экспериментальный буровой стенд с электротермомеханическим исполнительным органом*. Сб. "Термомеханические методы разрушения горных пород", ч. 5. Киев, 1972, 92-94.

15. Коробской В.К. *СВЧ-установка для исследования воздействия электромагнитной энергии на материалы*. Труды 2-й научно-технич. конф. по применению СВЧ-энергетики в народном хозяйстве, для исслед. целей и интенсификации технологич. процессов, Саратов, 1977, 11-12.

16. Кондрашов В.А., Москалев А.Н. *Исследование прочности крепких горных пород при облучении их энергией СВЧ*. Сб. "Физика горных пород и процессов". М., 1971, 179-180.

17. Явтушенко О.В., Коробской В.К. *Исследование воздействия СВЧ-энергии на некоторые горные породы*. Сб. "Механика и разрушение горных пород", ч. 4. Киев, 1976, 142 - 144

18. Коробской В.К., Абкин Е.Б., Чельшикина В.В. *Исследование*



- электромагнитных характеристик магнетитовых руд в СВЧ-диапазоне радиоволн. Изв. вузов. Горный журнал, 1988, № 8, 113-116.
19. Абкин Е.Б. и др. Измельчение руд с применением электромагнитной энергии СВЧ. Обогащение руд (Ленинград), 1986, № 6, 2-5.
20. Чельшикина В.В., Коробской В.К. Влияние обработки руды в электромагнитном поле на результаты её измельчения. Изв. вузов. Горный журнал, 1988, № 3, 115-117.
21. Образцов А.П., Красновский С.С. К определению эффективного режима воздействия плоской электромагнитной волны СВЧ на горную породу. Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород", ч. 2. Днепропетровск, 1972, 69-72.
22. Сельдищев А.М. К вопросу выбора рациональных ВЧ электрических полей в технологии обработки слоистых диэлектрических горных пород и минералов. Сб. "Физика горных пород и процессов". М., 1971, 181.
23. Образцов А.П., Уваров А.П., Максименко А.Г. Исследование эффекта объемного разрушения горных пород в сильных СВЧ-полях. Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород". Киев, Наукова думка, 1976, 149-150.
24. Образцов А.П., Блинов Л.М., Красновский С.С. Экспериментальное исследование "взрывного" разрушения горных пород в электромагнитном поле СВЧ. Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород", ч. 5. Днепропетровск, 1972, 49-52.
25. Красновский С.С., Уваров А.П. Исследование возможности снижения энергоемкости разрушения горных пород при воздействии мощных потоков СВЧ-энергии миллиметрового диапазона. Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Саратов, 1991, 49-51, 139-140.
26. Блинов Л.М., Ковальчук В.М. О возможности комбинированного плазменно-волнового воздействия на горные породы. Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород", ч. 5. Днепропетровск, 1972, 55-57.
27. Максименко А.Г., Уваров А.П. Исследование комбинированного СВЧ - механического воздействия на горные породы. Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Саратов, 1991, 71-73.
28. Цыганенко С.М., Ваганов Л.И. СВЧ-устройство для термомеханического разрушения горных пород. Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород", ч. 5. Днепропетровск, 1972, 53-55.
29. Цыганенко С.М. Передача энергии СВЧ в горные породы при электротермомеханическом разрушении в режиме резонанса электромагнитных волн. Сб. "Комплексные исследования физич. свойств горных пород". Тез. докл. М., МГИ. 1977, 76.
30. Badhurst D.H. et al. The applications of microwave energy in mineral processing and pyrometallurgy in Australia. SPRECHSAAL, 1990, 123, № 2, 194-197.
31. Lindroth D.P., Morell R.J., Blair J.R. Microwave assisted hard rock cutting. US Pat. № 5003144, cl. 219/10.55A (H05B 6/80), 1991.
32. Tranquilla J.M. Microwave treatment of metal bearing ores and concentrates. US Pat. № 5824133, cl. 75/10.13 (H05B 6/80), 1998.
33. Walkiewicz J.W., Clark A.E., McGill S.L. Microwave-assisted grinding. IEEE Trans. on Industry Appl., 1991, 27, № 2, 239-243.
34. Bond F.C. Crushing and grinding calculations. Brit. Chem. Eng., 1960, 6, 378-385, 543-548.
35. McGill S.L., Walkiewicz J.W., Smyres G.A. The effects of power level on the microwave heating of selected chemicals and minerals. Proc. Materials Res. Soc. Symp. Microwave Processing Materials, Reno, 1988, 124, 247-253.
36. Salsman J.B., Williamson R.L., Tolley W.K., Rice D.A. Short-pulse microwave treatment of disseminated sulfide ores. Minerals Eng., 1996, 9, № 1, 43-54.
37. Соловьев В.И. Взаимодействие мощных СВЧ-полей метрового диапазона с рудными породами различного состава. Обогащение руд, 2001, № 2, 13-14.
38. Мегвегов Ю.А. Лихорадка под золотым дождем. Разработка российских ученых может вернуть стране утраченное лидерство в золотодобыче. Известия, 1999, 15 июля, № 106.
39. Haque K.E. Microwave irradiation pretreatment of a refractory gold concentrate. Proc. of the Internet. Symposium on gold metallurgy. Winnipeg, Canada, 1987, 327-339.
40. Murray G. Microwave to slash refractory gold costs? Mining Magazine, 1998, 178, № 4, 276-278.
41. Колесник В.Г. и др. Влияние СВЧ-обработки на извлечение золота из минерального сырья. Цветные металлы, 2000, № 8, 72-75.
42. Лунин В.Д. и др. Могель процесса микроволнового воздействия на упорный золотосодержащий концентрат. Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых (Новосибирск), 1997, № 4, 89-94.
43. Чантурия В.А. и др. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов. Доклады РАН, 1999, 366, № 5, 680-683.
44. Котов Ю.А., Месяц Г.А. и др. Комплексная переработка пиритовых отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями. Доклады РАН, 2000, 372, № 5, 654-656.
45. Вершинин Ю.Н., Ильичев Д.С. Механизм электронной генерации в твердых диэлектриках при больших скоростях разряда. Доклады РАН, 2000, 374, № 2, 187-189.