

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

*Петров В.М.*, кандидат физико-математических наук, доцент

В статье дан обзор применения мощных источников электромагнитного поля СВЧ в горной промышленности для разупрочнения горных пород, приведены диэлектрические характеристики минералов, рассмотрен механизм термомеханического разрушения породы СВЧ-полем и требования к режиму разупрочнения перед помолом, а также описаны результаты пробных экспериментов.

С окончанием холодной войны многие направления оборонной техники оказались невостребованными, особенно же пострадала советская радиоэлектроника. Для радиолокации и систем противоракетной обороны в СССР были созданы самые мощные и совершенные генераторы сверхвысоких частот (СВЧ). Подобные генераторы разрабатывались также академическими организациями для применения в ускорителях заряженных частиц и установках управляемого ядерного синтеза. По мощности и коэффициенту полезного действия советские источники СВЧ существенно опережали зарубежные, в том числе и американские. В настоящее время эти разработки оказались замороженными, хотя еще частично сохранились уникальные технологии и производственные мощности, а также высококвалифицированные специалисты с их опытом и знаниями. Для сохранения существующего задела и кадров важно найти новые области применения в прошлом закрытой радиоэлектронике с тем, чтобы Россия могла занять лидирующие позиции в этой области.

Одним из возможных новых применений мощной радиоэлектронной техники может стать горная промышленность, где созданные оборонными и академическими предприятиями генераторы СВЧ и сопутствующая ап-

паратура могут быть переориентированы для добычи, измельчения и обогащения горных пород. Значительный научный задел в этом направлении в ряде горных институтов страны был сделан еще до 1990 года, когда велись интенсивные исследования по управлению свойствами горных пород с помощью различных физических воздействий [1].

Работы по разупрочнению горных пород и мерзлых грунтов СВЧ-полем при добыче, измельчении и бурении скважин велись в Москве (Горный институт, Институт горного дела им. А.А. Скочинского, НПП "Торий"), Ленинграде (Горный институт), Днепрпетровске (Институт геотехнической механики АН УССР, Университет), Новосибирске (Университет) и Якутске (Институт физико-технических проблем севера ЯФ СО АН СССР, Институт горного дела севера ЯФ СО АН СССР, Университет). По результатам работ было получено около ста авторских свидетельств СССР на изобретения новых способов и устройств обработки пород СВЧ-полем, опубликованы десятки статей и несколько монографий (например [2 - 4]). Регулярно проводились Всесоюзные конференции по новым применениям СВЧ-энергии в технологических процессах.

Измельчение породы до частиц с оптимальными для сепарации размерами (обычно 20 - 60

мкм) является наиболее дорогостоящим и энергоемким процессом в цепи передела, требующим не менее 20 кВт/ч электроэнергии на тонну породы. Однако на само разрушение породы при обычном механическом измельчении идет только 1% затрачиваемой энергии, а остальные 99% переходят в тепло и звук. Поэтому в усовершенствовании процесса измельчения таятся огромные возможности для энергосбережения. По сравнению с другими физическими методами разупрочнения пород (электрогидравлический удар, ультразвук, лазерное и ИК-облучение, электрический разряд и т.д. - см. [5]) СВЧ-метод имеет ряд преимуществ:

- объемный характер преобразования подводимой СВЧ-энергии в тепловую и механическую в пределах глубины проникновения, составляющей 0,1 - 1 м в метровом диапазоне волн;
- высокая скорость нагрева, достигающая  $10^6 - 10^8$  К/с при больших мощностях на оптимальной частоте, что обеспечивает режим термодара и переход от вязкого разрушения к наиболее выгодному энергетически хрупкому разрушению [6];
- бесконтактный способ ввода энергии разрушения в породу с высоким КПД (75 - 90%);
- малые потери энергии на

трение и теплоотвод к окружающим конструкциям;

- наличие промышленных генераторов и другого необходимого оборудования высокой мощности (50 - 300 кВт и более), способных обеспечить производительность обработки в 10 - 50 тонн породы в час.

Разупрочнение СВЧ-полем основано на резком (за время в  $10^{-5}$  -  $10^{-3}$  с) и неоднородном нагреве породы от нормальной температуры до сотен градусов. При этом на границах раздела фаз возникают сильные термомеханические напряжения, превышающие предел прочности и приводящие к микрорастрескиванию породы. Если при обычном механическом измельчении энергия затрачивается в значительной мере на разрушение пустой породы, то после СВЧ-обработки разрушение идет по границам раздела минералов, по местам включений, спайкам кристаллов и другим дефектам. Поэтому несмотря на затраты энергии на СВЧ-обработку общие энергозатраты на измельчение должны уменьшиться. Кроме того, при обычном измельчении в полученных для сепарации частицах содержится как нужный минерал, так и пустая порода, в результате чего в отвал уходит значительное количество добываемого сырья. Так, после флотации сульфидных руд теряется до 15 - 20% меди, до 40% цинка, до 80% тонкодисперсного упорного золота и других благородных металлов [7]. Одним из назначений обработки СВЧ-полем является повышение селективности раскрытия породы путем создания слабых мест по границам раздела фаз.

Оборудование для дробления, помола, истирания горных пород работает на предельных режимах и быстро изнашивается. Еще одним назначением СВЧ-разупрочнения может стать снижение амортизационных затрат на оборудование для измельчения.

Известно, что некоторые химические реакции в СВЧ-поле идут в десятки раз быстрее, чем без этого поля [8]. Не исключено, что после специальных исследований будут выявлены такие селективные реакции, которые позволят разделять металлы типа железо - никель, медь - никель, ниобий - тантал из общих растворов их соединений.

После пионерных советских работ по разрушению горных пород СВЧ-полем ([9 - 11] и др.) этим направлением заинтересовались за рубежом ([12 - 13] и др.). В США было выдано несколько патентов на СВЧ-разупрочнение руд перед помолом [14] и при срезании пласта [15], хотя на аналогичные способы и устройства уже имелись авторские свидетельства СССР с более ранним приоритетом ([16 - 20] и множество других). В распоряжении американских специалистов, как и советских горняков, имелись СВЧ-генераторы мощностью в 1 - 3 кВт, что явно недостаточно для получения режима термоудара и наиболее эффективного разрушения породы. Условия для полноценных экспериментов и создания промышленных установок имеются сейчас в России, где могут быть задействованы источники СВЧ-мощности в сотни киловатт.

### ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

Эффективность воздействия электромагнитного поля на горную породу определяется прежде всего диэлектрическими свойствами входящих в нее минералов, то есть комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

на частоте поля  $\omega = 2\pi f$ . Действительная составляющая комплексной проницаемости  $\epsilon'$  (или просто  $\epsilon$ ) определяет способность вещества к поляризации в электрическом поле, а мнимая  $\epsilon''$  - диэ-

лектрические потери или рассеиваемую мощность [21]. Важный для разупрочнения пород неоднородный нагрев зависит как раз от значений  $\epsilon''$  составляющих ее минералов.

По диэлектрическим свойствам минералы делятся на диэлектрики (алмаз, сера, флюорит, полевой шпат и т.д.) и проводники или полупроводники (золото, графит, пирит, никелит и т.д.). Диэлектрические потери в первой группе характеризуют тангенсом угла потерь  $\tan\delta$ , связанным с  $\epsilon''$  соотношением:

$$\epsilon'' = \epsilon \tan\delta$$

Во второй группе параметром, определяющим рассеиваемую мощность, является удельная электрическая проводимость

$$\gamma = \sigma \epsilon_0 \epsilon_0$$

( $\epsilon_0$  - электрическая постоянная, равная 8,854.1012 Ф/м).

При воздействии электрического поля частотой  $\omega$  и действующим значением  $E$  в единице объема вещества выделяется мощность  $p = \omega E^2 \epsilon'' \epsilon_0$ . В диэлектрических минералах удельная мощность равна

$$p = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon'' \tan\delta \quad (1)$$

а в проводящих

$$p = \gamma E^2 \quad (2)$$

Значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  минералов определяются существующими механизмами поляризации [21]. Во всех кристаллах имеется электронная поляризация. Кристаллы, обладающие только электронной поляризацией (с ковалентными связями), имеют низкую  $\epsilon$  (2-3, а самая большая - 5,7 - у алмаза) и очень низкий  $\tan\delta$  (порядка  $10^{-4}$ ), вплоть до оптических частот. В кристаллах с ионными связями дополнительный вклад в  $\epsilon$  вносит ионная поляризация. Поэтому диэлектрическая проницаемость у них выше: галит - 5,9, флюорит - 6,7, перовскит - 150 и т.д. Диэлектрические потери этих веществ остаются малы вплоть до ИК-диапазона, где начинается резонансная дисперсия. В качестве примера на рис. 1

даны частотные характеристики перовскита, а в табл. 1 систематизированы данные по диэлектрическим параметрам неполярных минералов (приведенные в таблицах и на рисунках данные взяты из [21 - 33]).

В полярных диэлектриках имеются постоянные диполи, способные к переориентации, дающие дополнительный вклад в  $\epsilon$  и потери. Среднее время переориентации обычно лежит в интервале  $10^{-3} - 10^{-9}$  с. На частотах  $10^3 - 10^9$  Гц, выше ко-

торых диполи не успевают переориентироваться за период изменения электрического поля, наблюдается релаксационная дисперсия и максимум диэлектрических потерь. В качестве примера на рис. 2 и 3 представлены частотные зависимости диэлектрических параметров для полевого шпата и гипса.

Полярные минералы обладают повышенными потерями и их  $tg\delta$  обычно лежит в интервале  $10^{-3} - 10^{-2}$ . В табл. 2 представлены диэлектрические параметры ряда по-

лярных минералов, измеренные в основном в диапазоне  $10^6 - 10^7$  Гц (данные в СВЧ-диапазоне практически отсутствуют).

В проводящих веществах значительный или основной вклад в диэлектрические потери вносит их электропроводность. Вклад в  $tg\delta$  сквозной проводимости  $tg\delta_L = \gamma/(\omega\epsilon_0 \epsilon)$  уменьшается с ростом частоты, но при  $\gamma$  выше 0,1 См/м оказывается определяющим даже в диапазоне СВЧ. Так, если удельная проводимость вещества равна 1 См/м и  $\epsilon = 10$ , то  $tg\delta_L = 0,75$  на частоте 2,4 ГГц. Поэтому в таких минералах рассеиваемая мощность поля определяется формулой (2) и не зависит от  $\epsilon$ . Данные о проводимости ряда минералов приведены в табл. 3.

В табл. 4 представлены диэлектрические параметры минералов с различными механизмами потерь - как релаксационными, так и сквозной проводимости.

Следует отметить, что потери проводимости в полупроводящих веществах сильно растут с ростом температуры, а также с увеличением влажности. В пористых минералах при их увлажнении проводимость сильно растет (рис. 4), что приводит к увеличению как диэлектрической проницаемости, так и потерь (рис. 5). В гетерогенных веществах, содержащих проводящие включения, каковыми являются многие горные породы, проводимость одной из фаз приводит к появлению миграционных диэлектрических потерь, которые зависят от частоты подобно релаксационным. Обычно максимум миграционных потерь лежит в области низких частот, однако в рудах с сильно проводящими минералами он оказывается в метровом или дециметровом диапазоне волн. Вклад в  $tg\delta$  миграционного механизма пропорционален содержанию проводящей фазы.

В сильных электрических полях, сравнимых с электрической прочностью воздуха, могут возник-

Табл. 1.

$10^3 - 10^9$  Гц, выше ко-

Диэлектрические параметры неполярных минералов			
Минерал	Состав	c по осям a,b,c	tgδ
Алмаз	C	5,7	$2 \cdot 10^{-4}$
Сера крист.	S	a 3,75, b 3,95, c 4,45	$5 \cdot 10^{-4}$
Кварц	SiO <sub>2</sub>	a 4,51, c 4,65	$2 \cdot 10^{-4}$
Халцедон	SiO <sub>2</sub>	4	$10^{-4} - 10^{-3}$
Корунд	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	a 11, c 9	$5 \cdot 10^{-5}$
Рутил	TiO <sub>2</sub>	a 88, c 170	$2 \cdot 10^{-4}$
Анагаз	TiO <sub>2</sub>	31	$10^{-4} - 10^{-3}$
Брукит	TiO <sub>2</sub>	78	$10^{-4} - 10^{-3}$
Периклаз	MgO	9,8	$4 \cdot 10^{-4}$
Шпинель	MgAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,3	$5 \cdot 10^{-4}$
Галит	NaCl	5,9	$3 \cdot 10^{-4}$
Сильвин	KCl	4,4	$10^{-4}$
Флюорит	CaF <sub>2</sub>	6,6	$10^{-4}$
Цинкиг	ZnO	a 8,2, c 11	$10^{-4} - 10^{-3}$
Циркон	ZrSiO <sub>4</sub>	a 11,5, b 12,6, c 12,8	$10^{-4} - 10^{-3}$
Цельсиан	BaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	6,7	$2 \cdot 10^{-4}$
Муллит	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	7	$10^{-4} - 10^{-3}$
Волластонит	CaO·SiO <sub>2</sub>	6,3	$5 \cdot 10^{-4}$
Клиноэнстатит	MgSiO <sub>3</sub>	7	$3 \cdot 10^{-4}$
Форстерит	Mg <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ]	a 7,1, b 7,6, c 7,1	$3 \cdot 10^{-4}$
Фаялит	Fe <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ]	a 8,8, b 8,9, c 8,6	$10^{-3}$
Оливин	(Mg <sub>1-x</sub> Fe <sub>x</sub> ) <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ]	a 7,2, b 7,6, c 7,0	$10^{-4}$
Гранаты:			
Пироп	Mg <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub>	11	$10^{-3}$
Анрадит	Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub>	10	$10^{-3}$
Гроссуляри	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub>	8,6	$10^{-3}$
Альмапдин	Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ] <sub>3</sub>	4,3	$10^{-3}$

кать частичные разряды, в результате чего появляются дополнительные ионизационные потери. Эти потери особенно существенны в пористых породах.

В минералах, являющихся анизотропными кристаллами, значения  $tg\delta$  зависят от кристаллографического направления. Поэтому в таблицах указаны значения параметров по разным осям. Диэлектрические параметры также зависят от примесей (рис. 6). В таблицах они указаны для чистых минералов или с минимумом загрязнений.

Воздействие сильного поля приводит к тому, что

порода быстро нагревается и ее параметры изменяются, потери растут. Рост потерь ведет к дальнейшему росту температуры и т.д. Вследствие этого может возникнуть лавинообразный процесс разогрева, вплоть до плавления породы [34].

Разрабатывая режимы обработки электромагнитным полем СВЧ, необходимо предварительно измерить диэлектрические характеристики данной конкретной горной породы в диапазоне частот и температур, что позволит выбрать оптимальную частоту и амплитуду поля. Для измерений электромагнитных параметров руд с

очень высокими диэлектрическими потерями ( $tg\delta$  порядка единицы) наиболее подходящим является метод коаксиальной измерительной линии [35 - 37].

Физические процессы разрушения пород СВЧ-полем, требования к частоте, амплитуде и времени воздействия, а также обзор проводившихся экспериментальных исследований будут приведены в продолжении статьи в следующем номере.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Новик Г.Я. Зильбершмидт М.Г. Управление свойствами пород в процессах горного производства. М., Недра, 1994.
2. Некрасов Л.Б. Основы электротермомеханического разрушения мерзлых пород. Новосибирск, Наука, 1979.
3. Мисник Ю.М. Основы разрушения мерзлых пород СВЧ-полями. Л., Изд-во ЛГУ, 1982.
4. Рябец Н.И. Основы разрушения и оттаивания мерзлых пород СВЧ энергией. Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1991.
5. Емелин М.А. и др. Новые методы разрушения горных пород. М., Недра, 1990.
6. Финкель В.М. Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. М., Металлургия, 1970.
7. Котов Ю.А. и др. Комплексная переработка пиритовых отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями. ДАН, 2000, 372, № 5, с. 654 - 656.
8. Clark D.E. Microwave processing of materials. Annu. Rev. Mater. Sci., 1996, 26, с. 299 - 331.
9. Абкин Е. Б. и др. Измельчение руд с применением электромагнитной энергии

**Табл. 2.**

Диэлектрические параметры полярных минералов			
Минерал	Состав	$\epsilon$	$tg \delta$
Топаз	$Al_2[SiO_4](F,OH)_2$	a 6,8, b 6,8, c 6,5	$10^{-2} - 10^{-3}$
Турмалин	боросиликат	a 6,3, c 7,1	$10^{-3}$
Диопсид	$CaMg[Si_2O_6]$	a 9,7, b 7,3, c 7,3	$10^{-3}$
Сподумен	$LiAl[Si_2O_6]$	a 7,6, b 8,2, c 10,5	$10^{-2} - 10^{-3}$
Эгирит	$NaFe[Si_2O_6]$	7,2	$10^{-2} - 10^{-3}$
Актинолит	$Ca_7(Mg, Fe)_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$	6,6	$10^{-2}$
Тальк	$Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$	5	$10^{-2}$
Хризотил асбест	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$	3,1	$10^{-2}$
Серпентин	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$	6,1	$10^{-2}$
Эпидот	$Ca_2(Al_{2-4}Fe_{0-2})Si_3O_{12}(OH)$	a 9,5, b 17,1, c 9,3	$10^{-2}$
Слюда:			
Мусковит	$KAl_2[AlSi_3O_{10}]OH$	a 13, c 7	a 0,2, c $10^{-4}$
Флогопит	$KMg_3[AlSi_3O_{10}]OH$	a 30, c 6	a 0,3, c $10^{-3}$
Биотит	$K(Fe, Mg)_3[AlSi_3O_{10}](OH, F)_2$	a 10, c 7	$10^{-2}$
Хлорит	$Mg_3[AlSi_3O_{10}](OH)_6$	a 15, c 7,3	a 0,1, c $2 \cdot 10^{-4}$
Канкринит	Na,K-алюмосиликат	a 12, c 9,6	a 0,2, c 0,04
Полевые шпаты:			
Альбит	$Na[AlSi_3O_8]$	a 12, b 8, c 6,5	0,08
Апортит	$Ca[Al_2Si_2O_8]$	7,2	$3 \cdot 10^{-4}$
Плагиоклаз 25 Ca, Na-алюмосиликат		7	$10^{-3} - 0,05$
Ортоклаз	$K[AlSi_3O_8]$	7	$10^{-3} - 0,05$
Микроклин	$K_{0,92}Na_{0,08}[AlSi_3O_8]$	a 4,7, b 5,8, c 5,8	$10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$
Роговая обманка Na,Ca,Mg,Fe-алюмосиликат		5	$10^{-2}$
Берилл зеленый	$Be_3Al_7[Si_6O_{18}]$	a 7,0, c 6,3	$10^{-3} - 10^{-2}$
Скаполит	$Na_4[AlSi_3O_8]_3Cl$	a 6,7, c 8,5	$10^{-2}$

СВЧ. Обогащение руд (Л-Д), 1986, № 6, с. 2 - 3.  
 10. Чельшкина В.В., Коробский В.К. Влияние обработки руды в электромагнитном поле на результаты ее измельчения. Изв. вузов. Горный журнал, 1988, № 3, с. 115 - 117.

11. Образцов А.П. и др. Экспериментальное исследование "взрывного" разрушения горных пород в электромагнитном поле СВЧ. Сб. Термомеханические методы разрушения горных пород. Ч. 5. Труды Всесоюз. конф. Днепропетровск, 1972, с. 49 - 52.

12. Walkiewicz J.W., Clark A.E., McGill S.L. Microwave-assisted grinding. IEEE Trans. on Industry Appl., 1991, 27, No.2, с. 239 - 243.  
 13. Salman J.B. et al. Short-pulse microwave treatment of disseminated sulfide ores. Mineral Eng., 1996, 9, No 1, с. 43 - 54.  
 14. Lindroth D.P., Morrell R.J., Blair J.R. Microwave assisted hard rock cutting. US Pat. No 5003144, 26.03.1991.  
 15. Tranquilla J.M. Microwave treatment of metal bearing ores and concentrates. US Pat. No 5824133, 20.10.1998.  
 16. Москалев А.Н. и др. Способ разрушения горных пород электромагнитными волнами. Авт. св. СССР № 724731, 2.04.1980.  
 17. Москалев А.Н. и др. Устройство для СВЧ-обработки сыпучих материалов. Авт. св. СССР № 1592958, 15.09.1990.  
 18. Заварин И.А. и др. Устройство для обработки или разрушения различных материалов электромагнитными волнами. Авт. св. СССР № 693005, 26.10.1979.  
 19. Шмырев В.В., Молохов М.Н. Окно для загрузки и разгрузки СВЧ-камеры нагрева. Авт. св. СССР № 1123118, 7.11.1984.  
 20. Мисник Ю.М. и др. Устройство для электротермомеханического разрушения горных пород. Авт. св. СССР № 740950, 16.12.1977.  
 21. Тареев Б.М., Короткова Н.В., Петров В.М., Преображенский А.А. Электрорадиодоматериалы. М., Высшая школа, 1978.  
 22. Петрофизика. Справочник. Т. 1. Горные породы и полезные ископаемые. М., Недра, 1992.  
 23. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика.

Табл. 3.

Электрическая проводимость рудных минералов		
Минерал	Состав	$\gamma$ , См/м
Золото	Au	$4,4 \cdot 10^7$
Графит крист.	C	а $10^4$ , с $2,5 \cdot 10^6$
Куприт	Cu <sub>2</sub> O	1 - 10
Халькозин	Cu <sub>2</sub> S	10 - 30
Ковеллин	CuS	$10^2 - 10^6$
Дигенит	Cu <sub>7-8</sub> S	> 1
Борнит	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	$10^2 - 10^3$
Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	$10^2 - 10^5$
Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 - $10^2$
Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10 - $10^2$
Титаномагнетит	(Fe, Ti) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1 - 1
Биксбит	(Fe, Mn) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1 - 10
Хромит	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	> 1
Касситерит	SnO <sub>2</sub>	10 - $10^3$
Уранинит	UO <sub>2</sub>	> 1
Пирит	FeS <sub>2</sub>	10 - $10^2$
Маркозит	FeS <sub>2</sub>	10 - $10^2$
Пентландит	(Fe, Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>	> 1
Цирротит	Fe <sub>1-x</sub> S	$10^4 - 10^6$
Молибденит	MoS <sub>2</sub>	10 - $10^3$
Сфалерит	ZnS	$10^{-5} - 10$
Галенит	PbS	$10^3 - 10^5$
Арсенопирит	FeAsS	0,1 - 1
Карролит	Co <sub>2</sub> CuS <sub>4</sub>	> 1
Теннантит	Cu <sub>3</sub> (Sb, As)S <sub>2</sub>	> 1
Никелит	NiAs	$10^5 - 10^6$
Ильменит	FeTiO <sub>3</sub>	1 - 10
Цирролюзит	MnO <sub>2</sub>	0,1 - 1
Манганит	MnO(OH)	> 1
Танталит	(Fe, Mn) (Nb, Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	> 1

Ред. Дортман Н.Б. М., Наука, 1984.

24. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. Справочник. Ред. Волярович М.П. М., Недра, 1988.
25. Берлинский А.И. Разделение минералов. М., Недра, 1988.
26. Мурзин В.Н. Колебательные спектры титанатов стронция, бария и кальция. Труды ФИАН. М., 1969, 48, с. 145 - 203.

27. Иоффе В.А., Хвостенко Г.И. Аномальная дисперсия диэлектрической проницаемости в полевых шпатах. ДАН, 1958, 118, № 4, с. 709 - 712.
28. Иоффе В.А., Янчевская И.С. Диэлектрические свойства некоторых кристаллических алюмосиликатов. Сб. Физика диэлектриков. Изд-во АН СССР. М., 1960, с. 182 - 193.

29. Мейснер Л.М. О диэлектрической проницаемости кристаллов со структурой рутила, анатаза и вюрцита. Кристаллография, 1975, 20, № 2, с. 226 - 230.
30. Тонконогов М.П. Диэлектрическая спектроскопия кристаллов с водородными связями. Протонная релаксация. УФН, 1998, 168, № 1, с. 29 - 54.
31. Алексеева З.М., Скорбун А.Д., Цивилева И.М. Исследование релаксационных процессов в кристаллах прустита и пираргирита. Изв. АН СССР, сер. Физ., 1984, 48, № 6, с. 1126 - 1130.
32. Савинцев П.А. К вопросу о физических свойствах ионных кристаллов. Сб. Физика диэлектриков. Изд-во АН СССР, 1958, с. 113 - 117.
33. Shannon R.D. Dielectric polarizabilities of ions in oxides and fluorides. J.Appl. Phys., 1993, 73, No 1, с. 348 - 366.
34. Петров В.М. О нелинейных свойствах сегнетоэлектриков на СВЧ. Изв. АН СССР, сер. Физ., 1960, 24, № 11, с. 1372 - 1375.
35. Петров В.М. Об измерении  $\epsilon$  и  $\text{tg } d$  диэлектриков методами полукоаксиального резонатора и коаксиальной измерительной линии. ПТЭ, 1960, № 4, с. 118 - 122.
36. Петров В.М. Методы и средства СВЧ-диэлектрических измерений радиоматериалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Сб. Методы и средства измерений электромагнитных характеристик радиоматериалов на ВЧ и СВЧ. Новосибирск, 1979, с. 8 - 12.
37. Петров В.М. Диэлектрические измерения сегнетоэлектриков. М., МИСИС, 1972.

Табл. 4.

ные спектры титанатов стронция, бария и кальция.

Диэлектрические параметры минералов с высокими потерями			
Минерал	Состав	$\epsilon$	$\text{tg } \delta$
Мрамор	$\text{CaCO}_3$	8,8	$10^{-2}$
Кальцит	$\text{CaCO}_3$	8	$10^{-2}$
Магнезит	$\text{MgCO}_3$	10,6	$10^{-2} - 10^{-3}$
Доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	7,7	$10^{-2}$
Сидерит	$\text{FeCO}_3$	7	$10^{-2}$
Церуссит	$\text{PbCO}_3$	23	$10^{-1} - 10^{-2}$
Стронцианит	$\text{SrCO}_3$	7	$10^{-2} - 10^{-3}$
Ангидрит	$\text{CaSO}_4$	6,5	$10^{-3}$
Англезит	$\text{PbSO}_4$	14	$10^{-2}$
Гипс	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7,9	$10^{-2}$
Бокситы:			
Диаспор	$\text{HAlO}_2$	6,2	$10^{-2}$
Бемит	$\text{AlO}(\text{OH})$	a 8,3, b 9,1, c 7,8	$10^{-2}$
Гидроаргиллит	$\text{Al}(\text{OH})_3$	8,4	$10^{-2}$
Гетит	$\text{HFcO}_2$	12	0,1
Лимонит	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	32	0,1
Якобсит	$\text{MnFe}_2\text{O}_4$	15	0,1
Хризокolla	$\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	13	$10^{-1} - 10^{-2}$
Шеслит	$\text{CaWO}_4$	a 11, c 9,5	0,1
Габнерит	$\text{MnWO}_4$	a 19,3, b 14,3, c 16,5	0,1 - 1
Повеллит	$\text{CaMoO}_4$	a 24, c 20	$10^{-2}$
Вульфенит	$\text{PbMoO}_4$	a 30, c 40	0,1
Экманит	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	a 13, c 11,8	$10^{-2}$
Крокоит	$\text{PbCrO}_4$	9,6	0,1
Прустит	$\text{Ag}_3\text{AsSe}_3$	30	0,1 - 1
Пираргирит	$\text{Ag}_3\text{SbS}_3$	20	1
Фторанатит	$\text{Ca}_3[\text{PO}_4]_2\text{F}$	a 10,4, c 8,5	$10^{-3}$



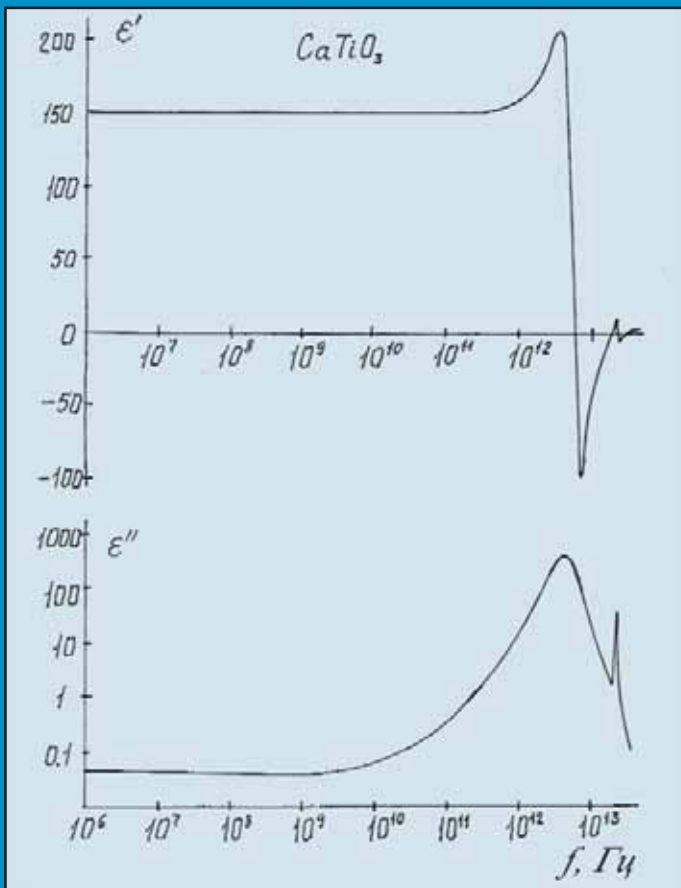


Рис. 1. Частотные характеристики перовскита [26].

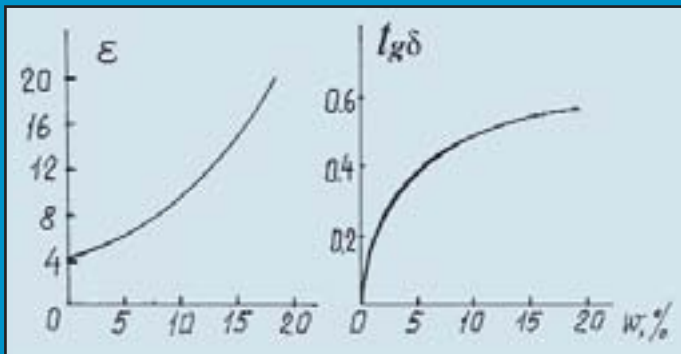


Рис. 5. Диэлектрические параметры глинистого сланца при различной влажности на частоте 32 МГц ( $\epsilon$ ) и 42 МГц ( $tg\delta$ ) [4].

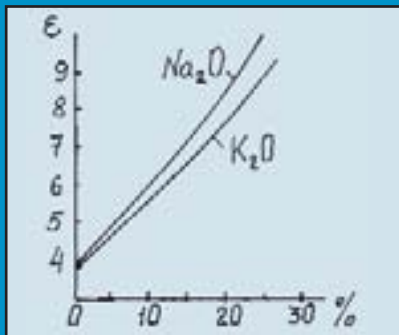


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости кварцевого стекла от содержания примесей оксидов калия и натрия [21].

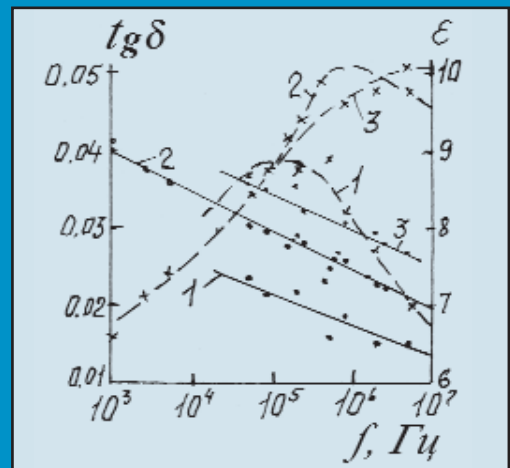


Рис. 2. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (сплошные кривые) и потерь (пунктирные) орто-лазера при температурах 246 К (1), 297 К (2) и 399 К (3) [27], [28].

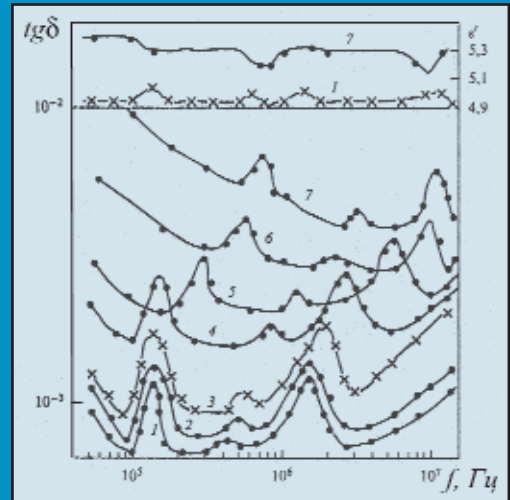


Рис. 3. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (верхние кривые) и тангенса угла потерь (нижние) гипса при температурах 86 К (1), 112 К (2), 124 К (3), 150 К (4), 200 К (5), 273 К (6) и 293 К (7) [30].

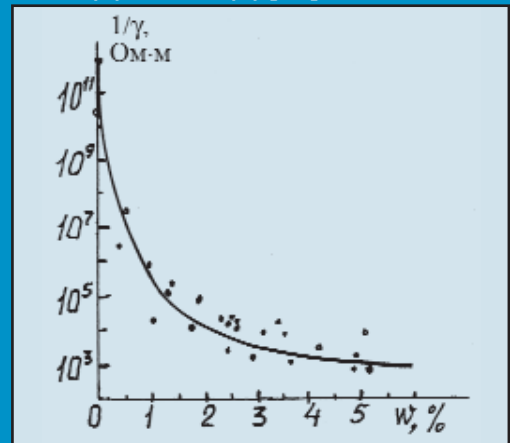


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления пористых пород от влажности [22].