

УДК 537.226:622.02.531

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ
ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ
НА КОНТАКТАХ ГОРНЫХ ПОРОД
С ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ**

А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Т.В. Овсянникова

Томский политехнический университет
E-mail: Lusi@tpu.ru

Приведены исследования параметров электромагнитных сигналов, зарегистрированных при акустическом воздействии на микродиорит, контактирующий с водным раствором NaCl, а также влияние электрического поля на параметры электромагнитной эмиссии сигнала такого контакта. Показано, что повышение процентного содержания NaCl в контактирующей с образцом жидкости приводит к изменениям в частотном спектре ЭМС. Увеличение напряженности электрического поля, в которое помещена система «образец микродиорита – минерализованная NaCl вода», приводит к пропорциональному возрастанию амплитуды спектра электромагнитного сигнала.

Ключевые слова:

Электромагнитный сигнал, минерализованная жидкость, акустическое воздействие, амплитудно-частотный спектр.

Key words:

Electromagnetic signal, mineralized liquid, acoustic impact, a peak-frequency spectrum.

В настоящее время наиболее перспективным методом контроля изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива и прогноза геодинамических событий в шахтном поле рудников является метод, основанный на механоэлектрических преобразованиях в горных породах и других диэлектрических структурах. Проведенные наблюдения на железорудном месторождении Таштагольское при профилировании в горных выработках и при стационарных наблюдениях в период проведения технологических взрывов показали, что характеристики электромагнитной эмиссии зависят не только от минерального состава горных пород, слагающих массив, его структурной неоднородности, но и от степени увлажнения массива. Наиболее водообильными являются зоны тектонических нарушений, трещин, контакты литологических

Беспалько Анатолий Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, ведущий науч. сотр. проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: besko48@tpu.ru

Область научных интересов: физика конденсированного состояния, методы и приборы контроля изменений напряженно-деформированного состояния горных пород и прогноз удароопасности.

Яворович Людмила Васильевна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: lusi@tpu.ru

Область научных интересов: физика конденсированного состояния, методы и приборы контроля изменений напряженно-деформированного состояния горных пород и прогноз удароопасности.

Овсянникова Татьяна Владимировна, магистрант Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: lusi@tpu.ru.

Область научных интересов: методы и приборы неразрушающего контроля, в том числе методы и приборы контроля изменений напряженно-деформированного состояния горных пород.

разностей пород и известняки. Водообильность повышается от однородных массивов пород к участкам с частой перемежаемостью различных пород малой мощности. Химический состав

подземных вод Таштагольского месторождения гидрокарбонатно-натриевый, кальциевый, минерализация изменяется от 0,2 до 0,4 г/л [1]. Сульфатные воды приурочены к тектоническим зонам и к контактам интрузивных пород со сланцами.

Наличие влаги является фактором, влияющим на устойчивость и прочность горных пород. Повышенная обводненность способствует прохождению без значительных отражений волн напряжений различной природы и интенсивности через разрабатываемый горный массив и увеличивает устойчивость породного массива при взрывных работах, а наличие пористой воды в порах снижает кристаллические межмолекулярные связи и прочность слагающих массив пород. В работах [2, 3] указывается, что в массиве горных пород влажность не является постоянной величиной. Ее значение определяется рядом факторов, в том числе размерами массива, скоростью испарения с его поверхности и конденсаций влаги на ней, скоростью влагопереноса в породе. При этом вода оказывает существенное воздействие на структуру и прочность горных пород. Однако если на механические свойства горных пород большое влияние оказывает количество и фазовое состояние воды, то на электрические свойства еще и минеральный состав воды. Главнейшими растворимыми минералами, которыми в основном и определяют химический состав вод, являются: галит KCl и каменная соль $NaCl$, гипс $CaSO_4$, кальцит $CaCO_3$, доломит $CaMgCO_3$. Таким образом, физические свойства горных пород в естественном залегании в значительной степени характеризуются их влажностью. Для контроля увлажнения горных пород и их контактов с водой внутри массива, в том числе и минерализованной, можно использовать изменения характеристик механоэлектрических преобразований в таких породах.

Ранее в работах [4] показано, что увеличение влажности образцов песчаника приводит к снижению амплитуды электромагнитного сигнала (ЭМС) по экспоненциальному закону и к преобладанию низкочастотной составляющей в амплитудно-частотном спектре ЭМС. В этих исследованиях проводилось динамическое воздействие на исследуемые образцы металлическими шариками. В этих исследованиях проводилось динамическое воздействие на исследуемые образцы металлическими шариками. Влияния минерализованной $NaCl$ дистиллированной воды на изменение параметров ЭМС песчаника, проведено в работе [5]. При выдерживании песчаника в дистиллированной воде амплитуда ЭМС существенно снижалась по сравнению с амплитудой сигналов из образца в исходном состоянии. Минерализация дистиллированной воды солью $NaCl$ сопровождалась возрастанием амплитуды и изменением спектра ЭМС песчаника. При этом амплитуда ЭМС пористого песчаника во всех случаях водонасыщения, сушки и минерализации пропорциональна энергии удара металлического шарика.

Сравним полученные нами результаты с традиционными геофизическими исследованиями удельного электрического сопротивления горных пород, которое является наиболее универсальным электромагнитным свойством. При этом следует отметить, что удельное электрическое сопротивление (j) горных пород изменяется в широком интервале от единиц до тысяч $Om \cdot m$. Для наиболее распространенных в реальных условиях залегания осадочных, изверженных и метаморфических горных пород j зависит от минерального состава, физико-механических и водных свойств горных пород, от температуры и глубины залегания, степени метаморфизма, а также от техногенных воздействий. Это же можно сказать и об исследуемых нами параметрах ЭМС. Химический состав растворенных в воде солей для геофизиков не играет существенной роли, поэтому по данным электроразведки судят лишь об общей минерализации.

Магматические и метаморфические горные породы в ненарушенном состоянии характеризуются высоким значением $j \geq 10^3 \dots 10^5 Om \cdot m$, которое уменьшается от нескольких тысяч до первых десятков $Om \cdot m$ с увеличением трещиноватости, закарстованности, глинистости, обводненности и минерализации подземных вод. Таким образом, при общих физических закономерностях свойств горных пород при геофизических методах исследований и методах с использованием механоэлектрических преобразований, между ними наблюдаются отличия. Так при увлажнении горных пород снижается их удельное электрическое

сопротивление и уменьшается амплитуда регистрируемых ЭМС. Увеличение степени минерализации воды, насыщающей породу, еще больше снижает j , а амплитуда ЭМС, при прохождении в них механоэлектрических преобразований, начинает возрастать [5]. Это обусловлено тем, что ионы, растворенных в воде химических элементов, имеют определенный заряд, который при механическом или акустическом воздействии на горную породу может смещаться, что приводит к изменениям дипольного момента двойного электрического слоя «порода-минерализованная вода» и, соответственно, параметров ЭМС. Влияние химического состава водных растворов солей, находящихся в порах и других дефектах горных пород, на параметры ЭМС пока не изучено.

Другим важным вопросом влияния воды, в том числе минерализованной, на параметры ЭМС при механоэлектрических преобразованиях является ее контакт с горными породами. Исследование параметров механоэлектрических преобразований при акустическом воздействии на границе «вода-горная порода» помогут выяснению природы электромагнитных сигналов, связанных с динамикой НДС горного массива, который находится в определенной гидрогеологической обстановке. Эти исследования будут способствовать развитию разрабатываемого нами метода мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам ЭМС и характеристикам электромагнитной эмиссии (ЭМЭ).

Ранее в работе [6] уже было показано, что при воздействии детерминированным акустическим импульсом происходит преобразование распространяющихся по исследуемому образцу акустических колебаний в электромагнитные в результате изменения дипольного момента двойных электрических слоев на границе раздела разнородных материалов. Вследствие этого во внешней среде появляется переменное электрическое поле, которое можно зарегистрировать специальной аппаратурой с использованием емкостных или индукционных датчиков.

Целью представленных в настоящей работе исследований является установление закономерностей изменений параметров электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении контакта горных пород с минерализованной жидкостью, а также выяснение влияния электрического поля на параметры электромагнитной эмиссии такого контакта.

Исследовался контакт минерализованной и не минерализованной воды с образцом микродиорита. Исследуемый образец был отобран на Таштагольском железорудном месторождении из микродиоритовой дайки в блоке 34 горизонта – 210 м. Образец темного цвета, тонкозернистой структуры с мелкими включениями пирита, образующего агрегаты, сложенные отдельными сформированными кристаллами. В образце имеются маломощные трещины, залеченные карбонатами и расположенные под углом $70...80^\circ$ к направлению распространения продольного акустического импульса.

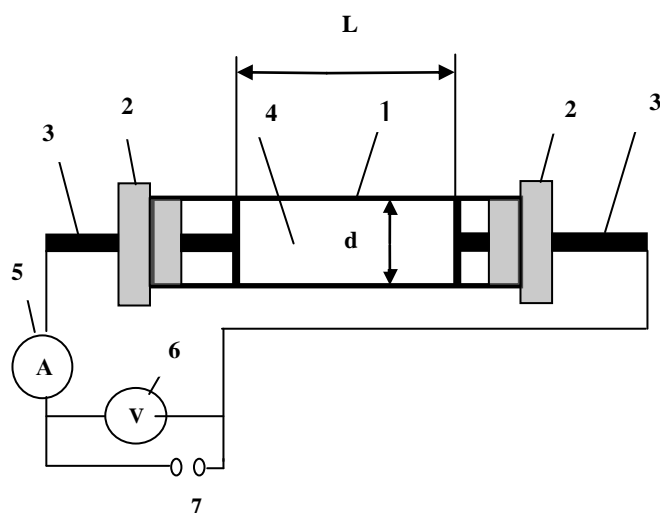


Рис. 1. Схема установки для измерения проводимости солевых растворов: 1 – стеклянная трубка; 2 – изоляционные заглушки; 3 – проводящие электроды; 4 – солевой раствор; 5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – источник постоянного напряжения

На первом этапе исследовали акустическое возбуждение контакта микродиорита и дистиллированной воды. В экспериментах были использованы методики: динамическое

возбуждение образца горной породы [6]; регистрация электромагнитного сигнала и быстрого преобразования Фурье; измерение проводимости солевых растворов. Образец имел форму параллелепипеда $80 \times 40 \times 40$ мм³. При проведении экспериментов образец зажимали в струбине вместе с пьезоакустическим приемником и направляющей шарика, возбуждающего при ударе детерминированный акустический импульс. Прием электромагнитных сигналов осуществляли с помощью дифференциального емкостного датчика с последующим усилением и регистрацией на экране осциллографа Tektronix TDS210. Затем сигналы записывали по последовательному порту RS232 в память персонального компьютера, где в дальнейшем по соответствующим программам производилась их обработка. Акустическая волна распространялась вдоль контакта воды и твердого образца.

Для определения удельного электрического сопротивления солевых растворов (j) применялось устройство, схема которого приведена на рис. 1. В стеклянную трубку (1) с внутренним диаметром $d = 11,8$ мм заливалась жидкость (4), которая представляла собой раствор соли NaCl определенной концентрации в дистиллированной воде. Заглушки (2), устанавливаемые на концах стеклянной трубки, предназначены для изоляции проводов при подаче напряжения на электроды, а также для исключения вытекания раствора из трубки. Расстояние между проводящими электродами L (3) выбирали равным 80 мм. При проведении измерений отслеживалось, чтобы между пластинами электродов (3) в солевом растворе не появлялись воздушные пузырьки. В процессе измерений от источника постоянного напряжения (7), марки Б5-13, подавали постоянное напряжение 40 В, при этом фиксировали значение тока по показанию амперметра (5). Зная диаметр трубки d и расстояние между электродами L , напряжение U и ток I , рассчитывали удельное сопротивление солевого раствора как $\rho = U\pi d^2/4IL$. На рис. 2 приведена зависимость удельного сопротивления солевого раствора от концентрации NaCl. Из рисунка видно, что с увеличением концентрации NaCl удельное сопротивление уменьшается по закону близкому к экспоненциальному.

Вначале экспериментов, проводимых на микродиорите, предполагали исследование параметров механоэлектрических преобразований без контакта с водой и водными растворами, но с помещением образца в электрическое поле, которое создавали с помощью источника постоянного тока и электродов площадью 240 мм². На верхний и нижний электроды подавали

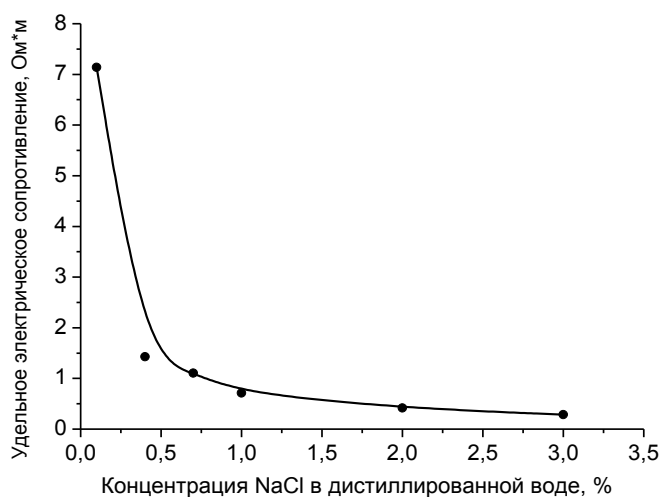


Рис. 2. Зависимость изменения удельного сопротивления от процентного содержания NaCl

поочередно положительный или отрицательный потенциал 40 или 100 В. Электрод на нижней грани образца был заземлен. Акустическое возбуждение осуществляли с помощью специального пружинного ударного устройства. Удар производили стальным шариком весом 0,68 г по стальной пластине, прижатой к торцевой грани образца, и регистрировали ЭМС. Акустический контакт пластины и образца создавался с помощью минерального масла.

В эксперименте выдерживалась геометрия, при которой направление

распространения акустического возбуждения было перпендикулярно силовым линиям электрического

емкость с соевым раствором. Верхний электрод оставался неизменным, а нижний электрод опускался в ёмкость с жидкостью.

В этом случае, так же как и в эксперименте с сухим образцом, создавали электрическое поле и проводили измерения электромагнитного сигнала при изменении процентного содержания NaCl в дистиллированной воде: 0,1; 0,4; 0,7; 1; 2; 3; 4 и 5 %. После удара шариком по образцу микродиорита регистрировали ЭМС системы «образец – минерализованная жидкость». С помощью процедуры быстрого преобразования Фурье были построены амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов. По полученным данным проведён анализ и построены зависимости изменения параметров ЭМС от процентного содержания NaCl в дистиллированной воде.

На рис. 3 приведены амплитудно-частотные спектры ЭМС для сухого образца (рис. 3, а) и находящиеся в контакте с 5 % рассолом (рис. 3, б) при напряжении на электродах 40 В, что соответствует напряженности электрического поля (E) 200 В/м. Видно, что при контакте образца породы с минерализованной жидкостью существенно изменяется амплитудно-частотный спектр. Появляются спектральные полосы, как в низкочастотной части спектра, так и в более высокочастотной.

Исследования влияния электрического поля в системе «образец – дистиллированная вода» показали, что увеличение напряженности от 50 до 500 В/м существенно не изменяет амплитуду и частотный спектр регистрируемого ЭМС. Тогда изменения в амплитудно-частотном спектре ЭМС, рис. 3, обусловлены только присутствием в воде соли NaCl. Для получения закономерностей влияния содержания соли в дистиллированной воде на параметры ЭМС в амплитудно-частотных спектрах были выбраны значимые частотные полосы с максимальными амплитудами. При напряженности электрического поля в 200 В/м (напряжение на электродах 40 В) такими частотами оказались 10 и 30 кГц, а для напряженности $E = 500$ В/м (напряжение на электродах 100 В) максимальная амплитуда ЭМС приходилась на частоту 97 кГц. На рис. 4 приведены зависимости изменения амплитуды частотных полос 10 кГц (рис. 4, а) и 30 кГц (рис. 4, б) от концентрации NaCl в

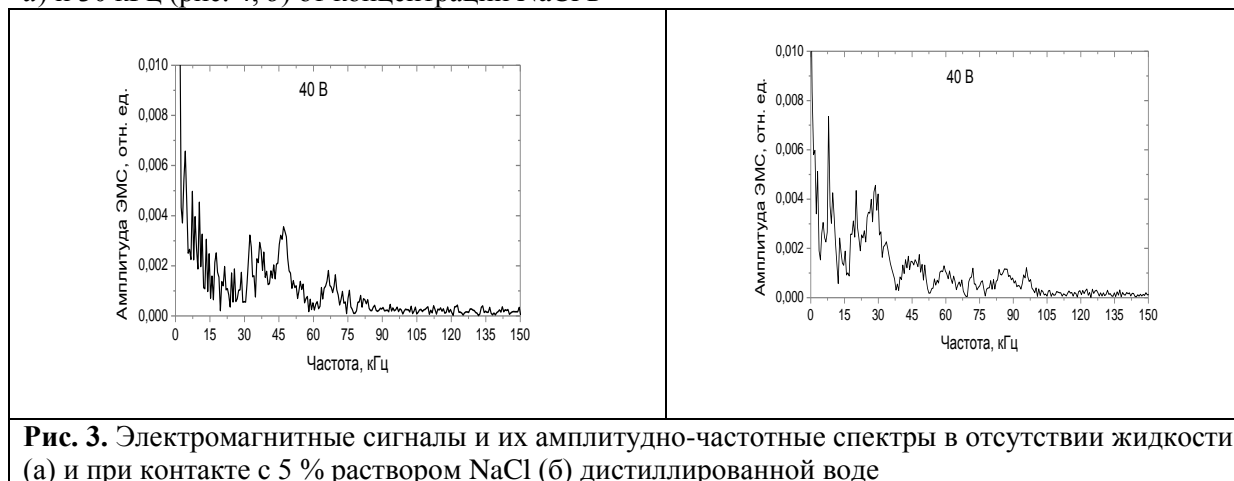


Рис. 3. Электромагнитные сигналы и их амплитудно-частотные спектры в отсутствии жидкости (а) и при контакте с 5 % раствором NaCl (б) дистиллированной воде

Видно, что полученные зависимости соответствуют экспонентам второго порядка. С увеличением концентрации соли наблюдается уменьшение

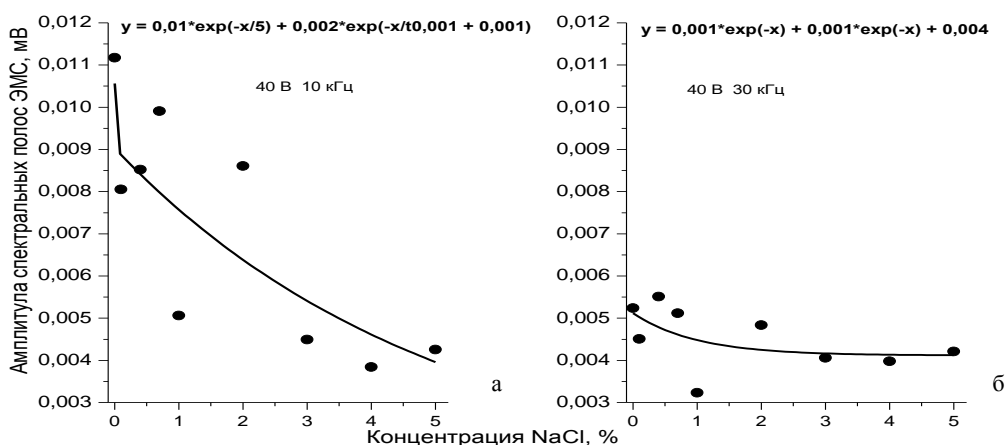


Рис. 4. Аппроксимированные зависимости амплитуды спектральных полос ЭМС от концентрации NaCl в дистиллированной воде: а) напряжение 40 В, спектральная полоса 10 кГц, б) напряжение 40 В, спектральная полоса 30 кГц

На рис. 5 показаны изменения амплитуд спектральной полосы 10 кГц при увеличении напряжения на электродах от 40 до 100 В. При увеличении напряжения, а соответственно и напряженности электрического поля в 2,5 раза, амплитуда спектральной полосы 10 кГц возросла примерно в 2,2 раза. Следует отметить, что амплитуда ЭМС с возрастанием процентного содержания соли NaCl при E равной 200 и 500 В/м уменьшается в обоих случаях по экспоненциальному закону. Как было показано ранее, при напряжении на электродах от 40 В и выше в спектре ЭМС появляется частота 97 кГц. Было установлено, что в постоянном электрическом поле с E , равной 500 В/м амплитуда спектральной полосы 97 кГц при концентрации соли в водном растворе до 3 % имеет большой разброс.

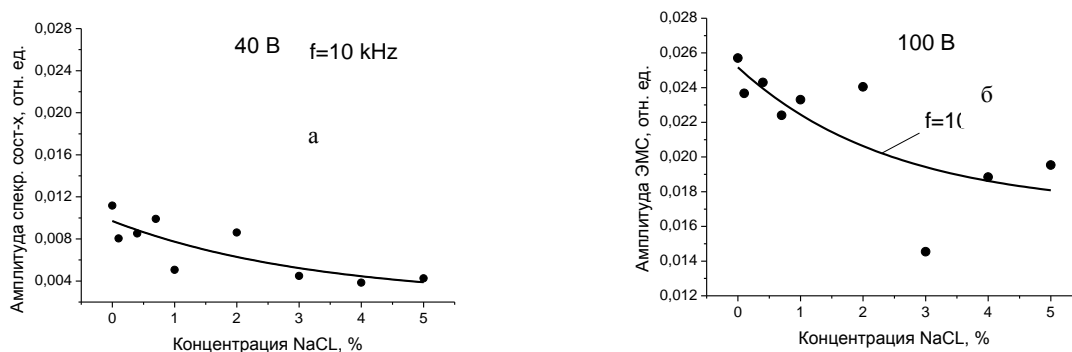


Рис. 5. Изменения амплитуды спектральной полосы 10 кГц от концентрации NaCl в дистиллированной воде при напряжении на электродах: а) 40; б) 100 В

Сравнивая зависимость изменения удельного электрического сопротивления водных растворов NaCl (рис. 2) и параметры спектральных полос от концентрации NaCl (рис. 4 и 5), можно сказать, что в общем случае амплитуда спектральных полос электромагнитных сигналов, возникающих при акустическом возбуждении системы «образец микродиорита-минерализованная жидкость» определяется удельным электрическим сопротивлением солевого раствора. Повышение проводимости минерализованной жидкости с увеличением концентрации соли приводит к изменениям зарядового состояния двойного электрического слоя при ее контакте с микродиоритом и, как следствие, к уменьшению амплитуды ЭМС. Проводя дальнейший анализ результатов проведенных экспериментов было установлено, что амплитудно-частотные спектры ЭМС при контакте образца микродиорита с дистиллированной водой и водносолевым раствором имеют существенные различия.

Добавление в дистиллированную воду соли NaCl приводит к появлению спектральных составляющих в низкочастотной части спектра до 25 кГц, а также высокочастотных гармоник около 100 кГц. При этом, как показано выше, амплитуда спектральной полосы 97 кГц с увеличением минерализации воды до 3 % приобретает устойчивый рост. Эти изменения, вероятно, обусловлены тем, что вода в пограничных слоях с минеральными стенками под воздействием поверхностных молекулярных сил приобретает свойства, отличающиеся от свойств «свободной» воды [7]. При этом под воздействием локальных электрических полей активных центров и самой контактной поверхности твердого тела молекулы воды стремятся к образованию цепочечных или плоских конфигураций, отвечающих новой симметрии среды.

Характер взаимодействия поверхности образца горной породы зависит от числа и расположения активных центров, которыми могут являться ненасыщенные элементы различных минералов, входящих в микродиорит. В результате на границе воды и микродиорита образуется двойной электрический слой, который при акустическом возбуждении этого контакта дает определенный электромагнитный сигнал. Привнесение в дистиллированную воду NaCl до 3 % нелинейно изменяет количество и геометрию активных центров, а после ее достижения количество и геометрия активных центров растет линейно с концентрацией солевого раствора, что приводит к изменениям в двойном электрическом слое и, как следствие, к изменениям в амплитудно-частотном спектре ЭМС, которые мы наблюдаем.

Таким образом, проведенные исследования параметров электромагнитных сигналов, возникающих при акустическом возбуждении образца микродиорита, контактирующего с минерализованной жидкостью, показали, что изменения в амплитудно-частотном спектре ЭМС при увеличении процентного содержания NaCl в дистиллированной воде носят двойственный характер. С одной стороны, амплитуда спектральных полос электромагнитных сигналов, регистрируемых в такой системе еще на стадии контакта образца с дистиллированной водой, определяется удельным электрическим сопротивлением солевого раствора и, как следствие, уменьшается с увеличением его концентрации. С другой стороны, повышение процентного содержания NaCl в контактирующей с образцом жидкости приводит к изменениям в частотном спектре ЭМС и появлению частотных полос, амплитуда которых линейно повышается с ростом концентрации солевого раствора. Увеличение напряженности электрического поля, в которое помещена система «образец микродиорита-минерализованная NaCl вода», с 200 до 500 В/м приводит к пропорциональному возрастанию амплитуды спектра электромагнитного сигнала. Полученные закономерности необходимо учитывать при разработке информационной системы контроля и прогноза геодинамических событий в шахтном поле рудников.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 11-07-00666-а, №11-07-98000-р_сибирь_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров П.В., Шевелев Ю.А., Матвеев И.Ф., Скляр Н.И., Квочин В.А. Управление состоянием массива горных пород на рудниках Горной Шории, Кемерово: Куз ГТУ, АГН, 1999. – 257 с.
2. Боровков Ю.А., Фурман С.В. Оценка влияния увлажнения и минерального состава горных пород на их прочностные свойства для прогноза возможного прорыва подземных вод в рудник пород// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №1, с. 276–280.
3. Кучурин С.В., Шкуратник В.Л., Винников В.А. Закономерности влияния помеховых факторов на термоэмиссионный эффект памяти в образцах угля // ФТПРПИ. – 2008. – № 2. – С. 21–28.
4. Яворович Л.В., Беспалько А.А. Связь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород// Деп. В ВИНТИ 04.10.06. – № 1198. – В. 2006. – С.194.
5. Беспалько А.А., Яворович Л.В. Исследование влияния концентрации водного раствора NaCl на параметры электромагнитного сигнала песчаников // Известия вузов. Физика. – 2008. – № 11/2. – С. 117–120.

6. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Гольд Р.М., Дацко Д.И. Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии // ФТПРПИ. – 2003. – № 2. – С. 8–14.
7. Маленков Г.Г. Зеркально-симметричная структура жидкой воды и опыт геометрического подхода к связанной воде // Сб. «Современное представление о связанной воде в породах» – М.: Изд-во АН СССР, 1963.

Поступила 31.11.2011 г.