

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  $\text{KCl}$  и каменная соль  $\text{NaCl}$ , гипс  $\text{CaSO}_4$ , кальцит  $\text{CaCO}_3$ , доломит  $\text{CaMgCO}_3$ . 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  $\text{NaCl}$  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  $\text{NaCl}$  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  $\text{Om}\cdot\text{m}$ . 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  $j \geq 10^3 \dots 10^5 \text{Om}\cdot\text{m}$ , которое уменьшается от нескольких тысяч до первых десятков  $\text{Om}\cdot\text{m}$  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

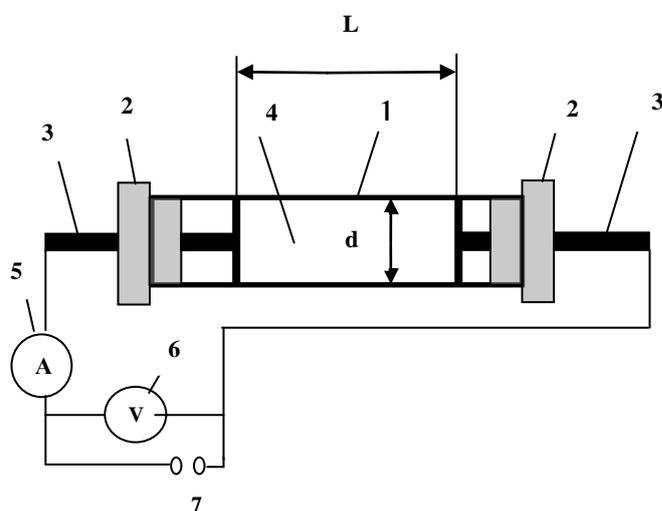
сопротивление и уменьшается амплитуда регистрируемых ЭМС. Увеличение степени минерализации воды, насыщающей породу, еще больше снижает  $j$ , а амплитуда ЭМС, при прохождении в них механоэлектрических преобразований, начинает возрастать [5]. Это обусловлено тем, что ионы, растворенных в воде химических 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.



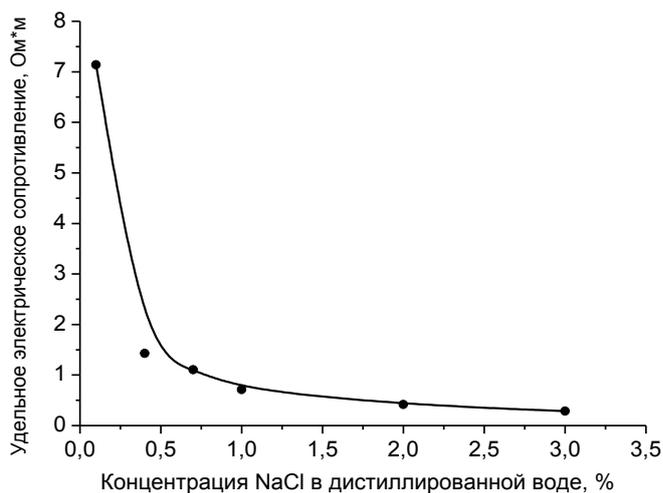
**Рис. 1.** Схема установки для измерения проводимости солевых растворов: 1 – стеклянная трубка; 2 – изоляционные заглушки; 3 – проводящие электроды; 4 – солевой раствор; 5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – источник постоянного напряжения

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  $80 \times 40 \times 40$  мм<sup>3</sup>. 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 мм<sup>2</sup>. 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

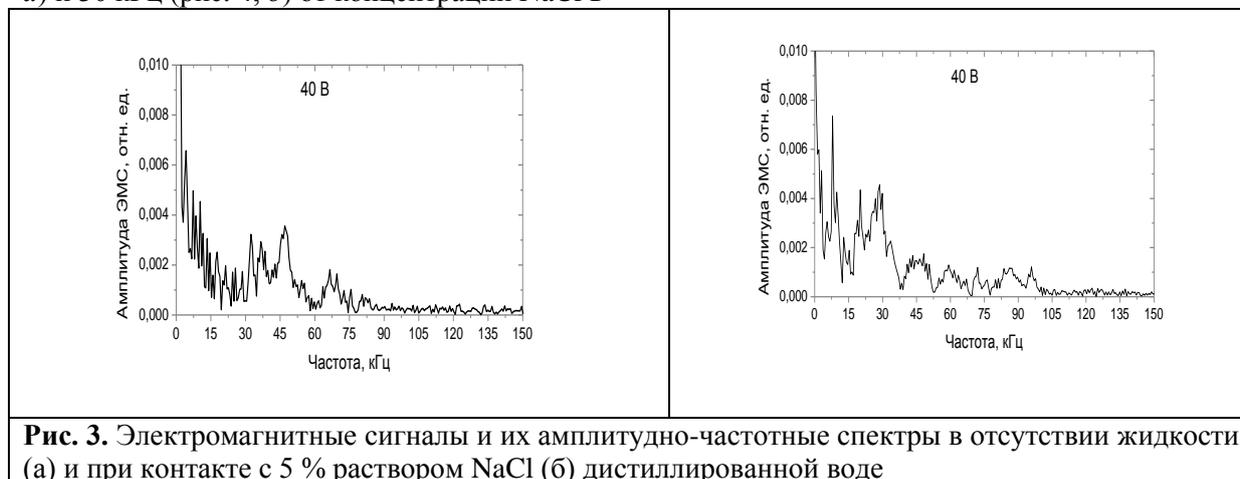
распространения акустического возбуждения было перпендикулярно силовым линиям электрического

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.

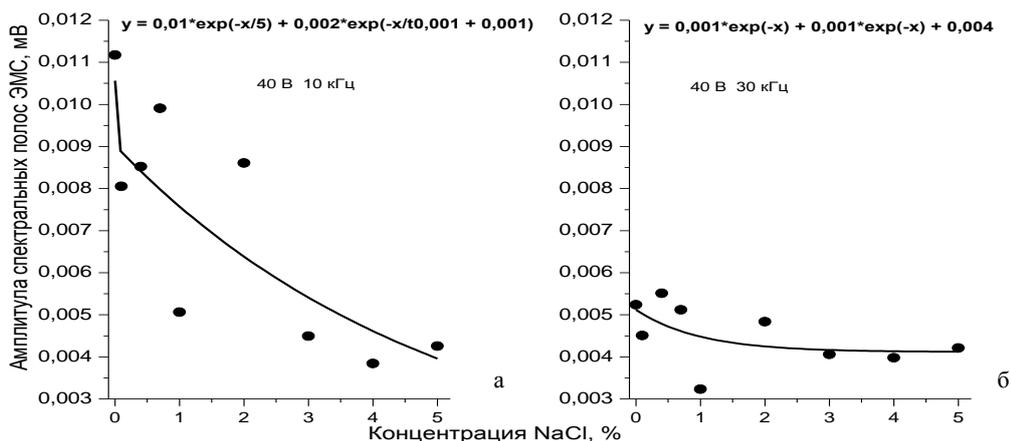
На рис. 3 приведены амплитудно-частотные спектры ЭМС для сухого образца (рис. 3, а) и находящиеся в контакте с 5 % рассолом (рис. 3, б) при напряжении на электродах 40 В, что соответствует напряженности электрического поля ( $E$ ) 200 В/м. Видно, что при контакте образца породы с минерализованной жидкостью 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



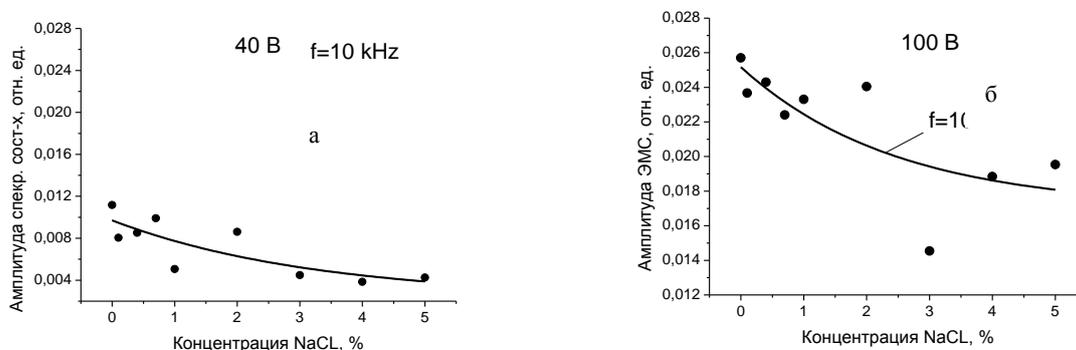
**Рис. 3.** Электромагнитные сигналы и их амплитудно-частотные спектры в отсутствии жидкости (а) и при контакте с 5 % раствором NaCl (б) дистиллированной воде

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 жидкостью 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.