

УДК 550.834

UDC 550.834

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОБРАЗЦЫ ГОРНЫХ ПОРОД**ELECTRICAL PHENOMENA ASSOCIATED WITH DYNAMIC IMPACT ON ROCK SAMPLES**

Панфилов Андрей Андреевич
м.н.с.

Panfilov Andrey Andreivich
Junior researcher

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, Россия, 685000, Портовая, 16.
E-mail: panfilov@neisri.ru*

North-East Interdisciplinary Science Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia, 685000, Portovaya, 16. E-mail: panfilov@neisri.ru

Исследовано электрическое СНЧ/ОНЧ излучение образцами горных пород при постепенном нагружении и ударном воздействии. Изучено изменения удельного электрического сопротивления образцов горных пород при ударном воздействии

SLF/VLF electric radiation emitted by rock samples due to the slow-growing pressure and the shock impact was studied. Rock samples' specific electrical resistance change due to the shock impact is examined

Ключевые слова: ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ГОРНЫЕ ПОРОДЫ, УДАР, ДАВЛЕНИЕ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

Keywords: ELECTRIC RADIATION, ELECTRICAL RESISTANCE, ROCK, SHOCK IMPACT, PRESSURE, EARTHQUAKE

Введение. Известно, что часть землетрясений сопровождается электромагнитными (ЭМ) явлениями [1, 3-6, 10]. Регистрацией и изучением ЭМ аномалий, связанных с сейсмическими процессами, занимаются во многих странах [1-11]. Однако природа явлений остаётся не ясной. Это не позволяет достоверно выделять на фоне большого количества техногенных помех и естественных шумов полезный сигнал, возможно являющийся предвестником сейсмического события.

Одними из причин появления ЭМ излучения при подготовке, непосредственно в момент землетрясения и, нередко, после него можно считать пьезоэлектрический эффект и электризацию трещин при разрушении горных пород в области подготовки землетрясения [2, 12-16]. При землетрясениях также происходит изменение электропроводности горных пород в области сейсмического события [13, 15, 17].

Известно, что изменение сопротивления среды влияет на характер распространения в ней ЭМ волн [18], поэтому для понимания как формируется регистрируемый на приёмных станциях сейсмоэлектромагнитный

(СЭМ) предвестник необходимо определить и то, как изменяется электропроводность горных пород в области подготовки землетрясения при динамическом воздействии.

Поскольку гипоцентр землетрясения находится на больших глубинах, изучение в естественных условиях, протекающих в нём процессов, не представляется возможным. Наиболее оптимальным вариантом изучения природы СЭМ процессов является проведение лабораторных экспериментов на образцах горных пород.

Целью работы является изучение особенностей изменения характеристик электрической составляющей ЭМ излучения (частота, амплитуда) и удельного электрического сопротивления образцов горных пород в результате ударного воздействия и постепенного нагружения.

Для лабораторных экспериментов была сформирована коллекция образцов горных пород из 3-х групп, в которые вошли образцы интрузивных, осадочных пород, а также мономинералов. Каждая группа включала 2-3 геологических объекта, из каждого объекта отбирали по 10 образцов. В коллекцию вошли образцы с геологических объектов: рудопроявление «Нодди» (месторождение «Кубака»), интрузивный массив «Столовый», Бургагинский шток (месторождение «Школьное»), Нижне-Аликинский массив, Омчакский и Мякит-Хурчанский рудные узлы.

Образец, предназначенный для ударного воздействия, представляет собой куб со сторонами 19 мм. Для работы с постепенным нагружением была подготовлена группа образцов различных типов горных пород кубической формы с размерами граней 2 см, 3 см, 4 см.

Перед экспериментом образцы помещали, согласно отработанной методике [19], на 96 часов в воду. После этого измеряли электрическое сопротивление, а затем образцы подвергались ударному воздействию. Каждый из них был подвергнут пяти ударам. Воздействие осуществляли стальным шариком с массой 31,4 гр, который падал с высоты 243 мм. Да-

лее, в течение 1 мин. измеряли электрическое сопротивление. Длительность измерения была подобрана с учётом скорости высыхания поверхностей образцов – при измерениях дольше 1 минуты их электрическое сопротивление быстро увеличивается, за счёт испарения влаги.

Нагрузению образцы подвергались в сухом состоянии до их полного разрушения (максимальное давление составляло 312,5 МПа).

В отличие от аналогичных работ, проведённых другими исследователями [13, 15, 20], нами был выполнен спектрально-временной анализ ЭМ откликов на ударное и нагрузочное воздействие на образцы горных пород. Для обработки записей ЭМ откликов на динамическое воздействие была составлена программа на основе дискретного преобразования Фурье.

В связи с тем, что на территории Магаданской области функционирует сеть СЭМ станций регистрирующих ЭМ аномалии сейсмогенного характера в ОНЧ диапазоне [21], а также, учитывая особенности распространения ЭМ волн в среде [22], в частности в земной коре, для исследования были выбраны СНЧ и ОНЧ радиодиапазоны.

Электрическая проводимость.

На рисунках 1, 2 изображены результаты измерения удельного электрического сопротивления образцов различных типов пород. После ударов электропроводность меняется незначительно. Вероятно, это можно объяснить недостаточной силой ударов, которые не привели к существенным структурным изменениям.

Малые отклонения сопротивления от начальных значений связаны с наличием изначально существующих микротрещин, которые в результате динамического воздействия претерпевали незначительные изменения.

Были проведены дополнительные опыты с отдельно взятыми образцами (рис. 3, 4). Выяснилось, что при многократном ударном воздействии (900 ударов) удельное электрическое сопротивление влажных образцов значительно снижается (до 9 раз), а сухих образцов увеличивается в 2

раза. Уменьшение электрического сопротивления вероятно обусловлено образованием новых и раскрытием старых трещин, и заполнением их проводящим раствором.

Можно предположить, что такие же процессы происходят в очаге готовящихся землетрясений. Наблюдавшиеся аномалии электрического сопротивления авторы работы [15] связывают с подземными водными источниками, которые заполняют трещины в горных породах, образованные в процессе подготовки сейсмического события и, тем самым, существенно повышают общую электропроводность зоны очага землетрясения.

Электромагнитное излучение.

В ходе экспериментов были записаны ЭМ отклики на ударное воздействие на образцы горных пород. По мере роста числа ударов (до 5), форма ЭМ и сейсмического импульсов менялась не значительно. Так уровень регистрируемого излучения варьировал в пределах на 3-4 Дб. Такое поведение можно объяснить случайным характером образования микро-разрушений, и с неравномерным распределением пьезоэлектрического материала (кварца) внутри исследуемых образцов [13]. Записи для образцов, не содержащих пьезоэлектрик, характеризуются более низким уровнем регистрируемого ЭМ сигнала. В среднем величина ЭМ сигнала для образцов с пьезоэлектриком была на 50% выше, чем в случае с образцами, не содержащими пьезоэлектрик. Это можно объяснить тем, что ЭМ эффекты, связанные с образованием трещин при ударном воздействии, менее выражены, чем для образцов, содержащих пьезоэлектрик [15].

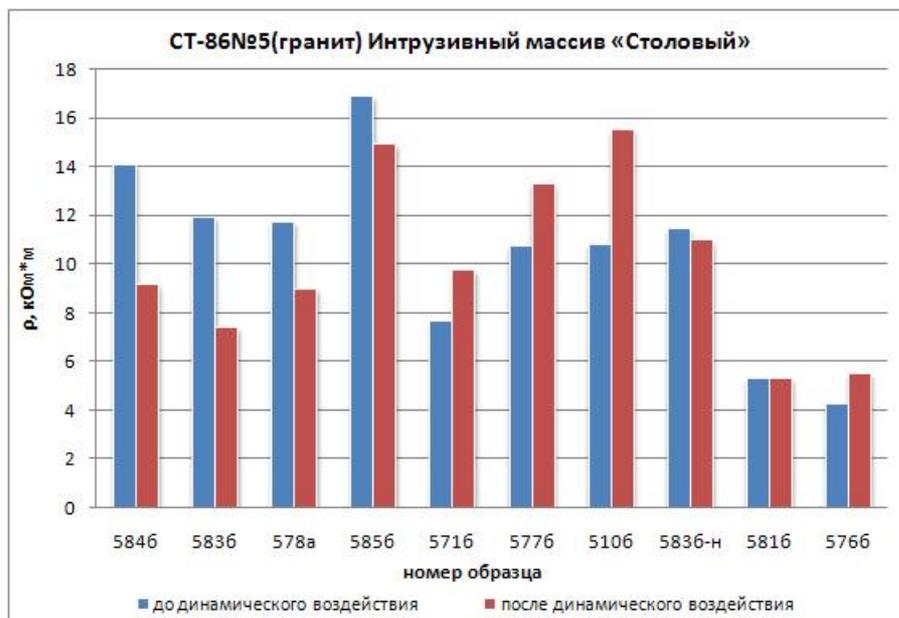


Рисунок 1. Изменение удельного электрического сопротивления в результате ударного воздействия на образцы гранита

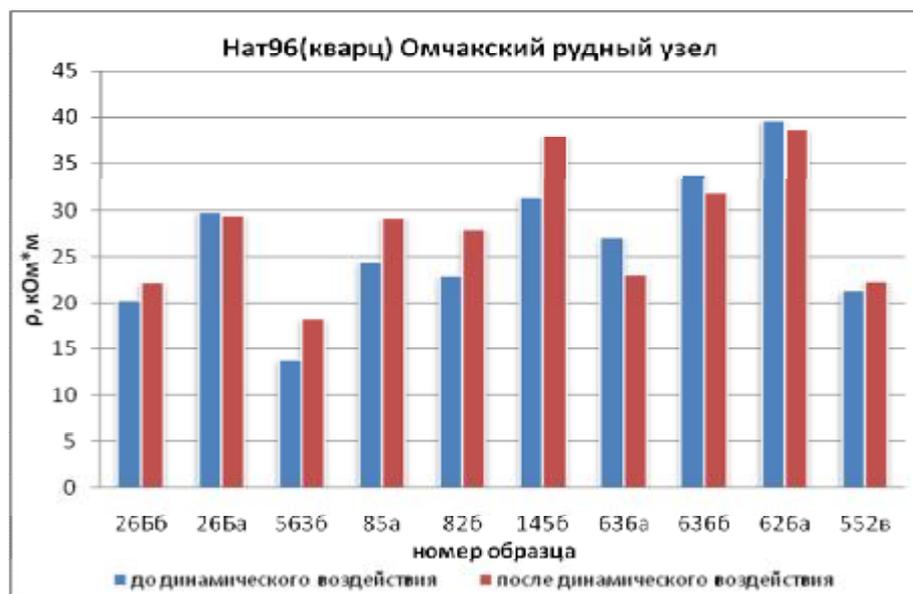


Рисунок 2. Изменение удельного электрического сопротивления в результате ударного воздействия на образцы кварца

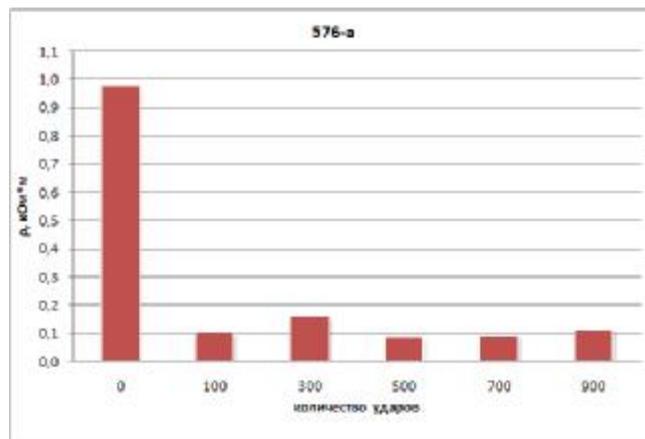


Рисунок 3. Изменение удельного электрического сопротивления обводнённого образца в результате роста числа ударов

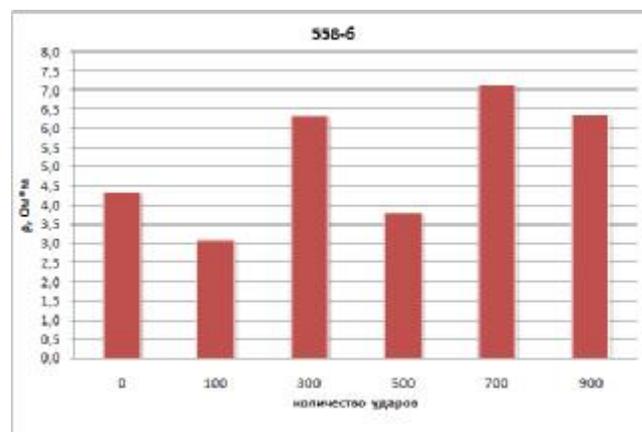


Рисунок 4. Изменение удельного электрического сопротивления сухого образца в результате роста числа ударов

На рисунке 5 представлены спектрограммы ЭМ сигнала, возникающие при ударном воздействии на образцы гранодиорита интрузивного массива «Столовый». Видно, что в момент удара энергия ЭМ импульса лежит в области частот от 0 до 15 кГц. Основная энергия сигнала лежит в области 0-6 кГц.

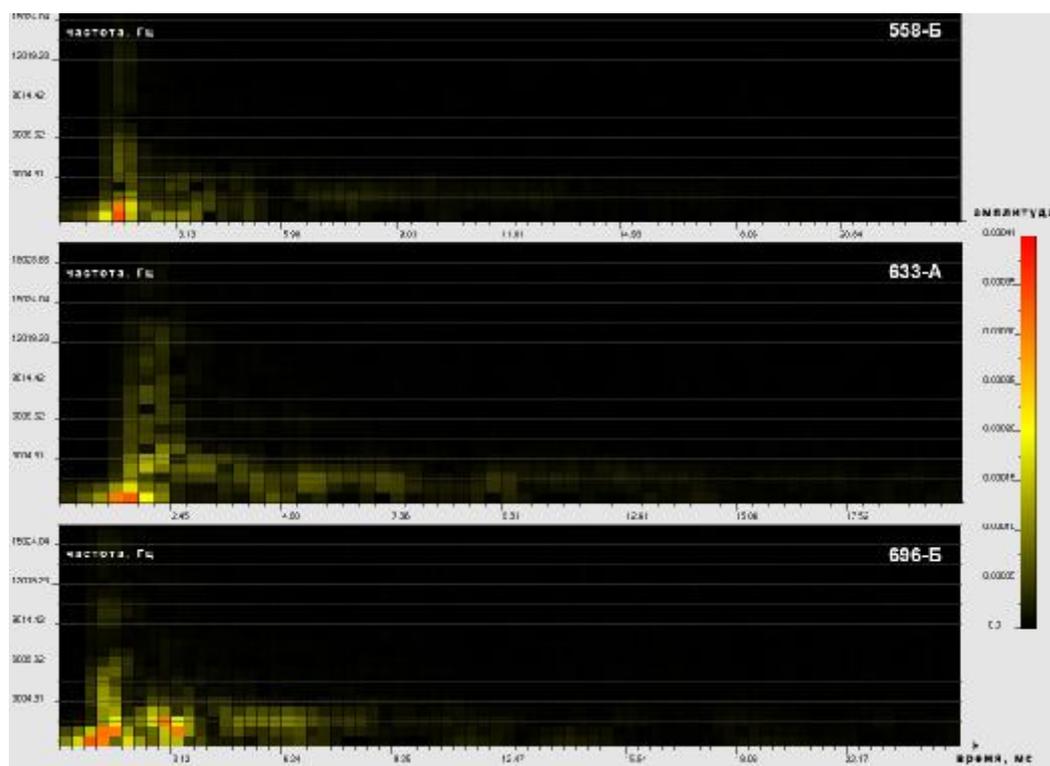
При ударах образцов гранита (рис. 6) основная доля энергии сигнала, как и в случае с гранодиоритом, приходится на область частот 0-6 кГц. В отличие от гранодиорита при ударах образцов гранита в сигнале присут-

ствует высокочастотная составляющая в области от 6 до 22 кГц, но амплитуда в этой зоне мала (за исключением образца 576-Б).

Образцы гранита и гранодиорита относящиеся к Бургагинскому штоку (месторождение Школьное) имеют сходные между собой частотные характеристики.

Если для гранита и гранодиорита (для всех образцов) максимумы амплитуд ЭМ импульса лежат в области менее 6 кГц, то для кварца максимумы находятся в более высокочастотной области (рис. 7).

Для всех образцов при ударном воздействии ЭМ импульс характеризуется резким увеличением амплитуды в широком диапазоне частот (0 – 22 кГц), затем резким уменьшением амплитуды на частотах выше 6 кГц, далее постепенным затуханием сигнала на частотах ниже 6 кГц.



При воздействии на образцы горных пород постепенным нагружением давление осуществлялось до полного их разрушения. При этом вели регистрацию возбуждаемого ЭМ сигнала. На рисунке 8 показана серия ЭМ импульсов от момента начала сдавливания образца до полного его разрушения.

В 50% случаев разрушение образцов сопровождалось появлением серии ЭМ импульсов, которые можно объяснить постепенным накоплением напряжения и последующим стремительным образованием серии трещин, с высвобождением энергии в виде ЭМ излучения. В 25% записей отмечался только один ЭМ импульс, в 25% - ЭМ сигнал отсутствовал.

Наиболее сильный сигнал отмечали при разрушении кубиков кварца. Образцы гранита и гранодиорита характеризуются меньшей интенсивностью излучения (рис. 9).

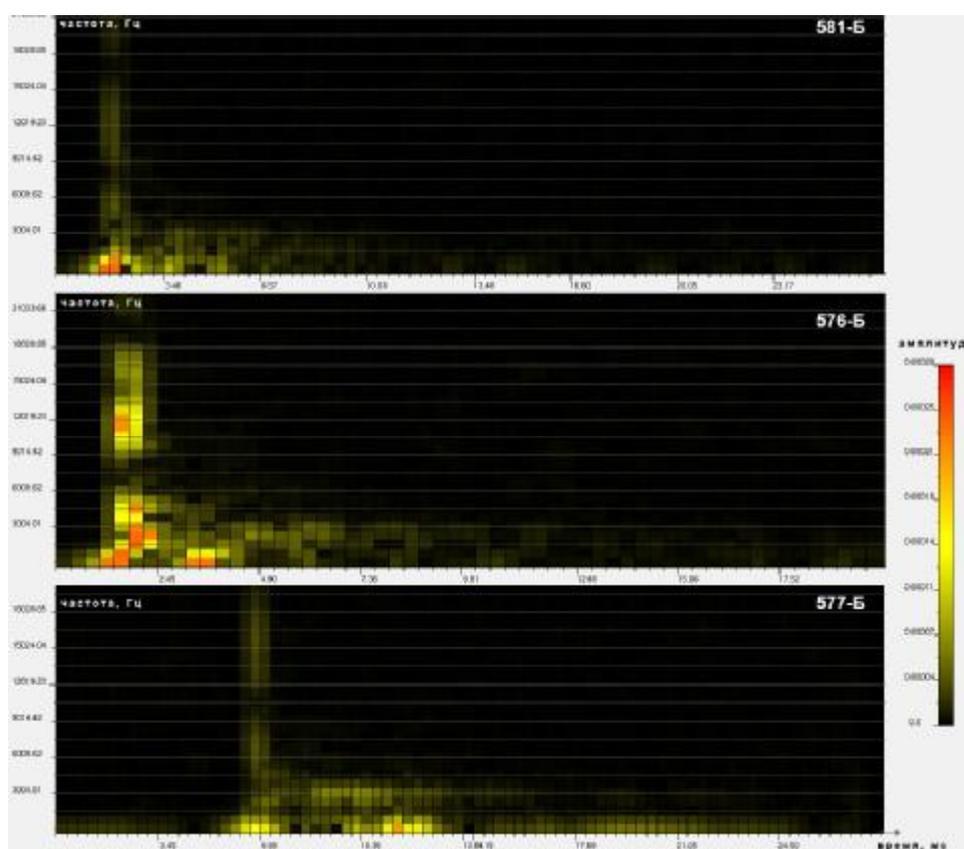


Рисунок 6. Спектрограмма ЭМ импульсов, возбуждаемых образцами гранита (интрузивный массив «Столовый») при ударном воздействии

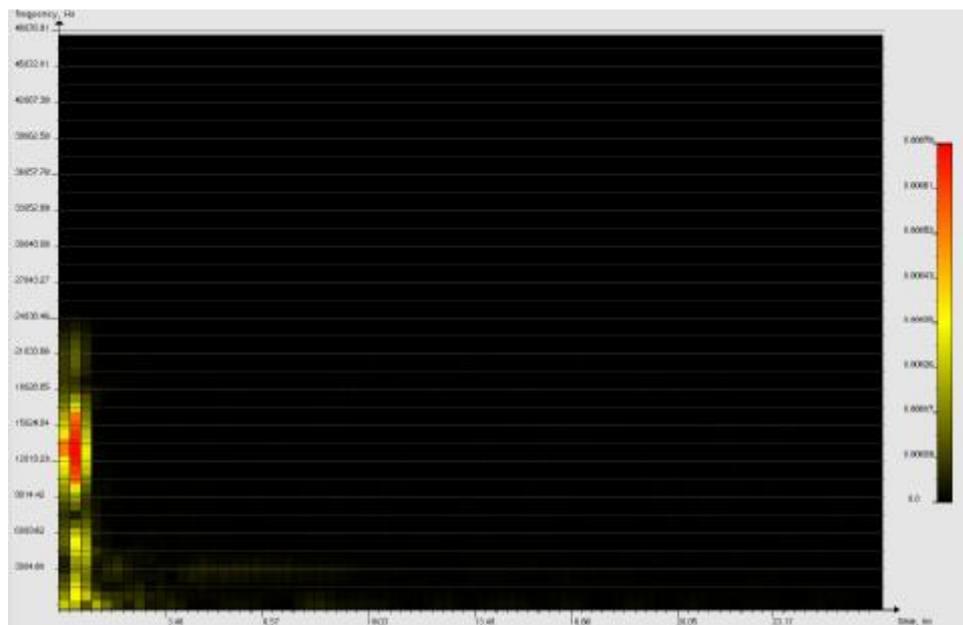


Рисунок 7. Спектрограмма ЭМ импульса, возбуждаемого образцом кварца при ударном воздействии

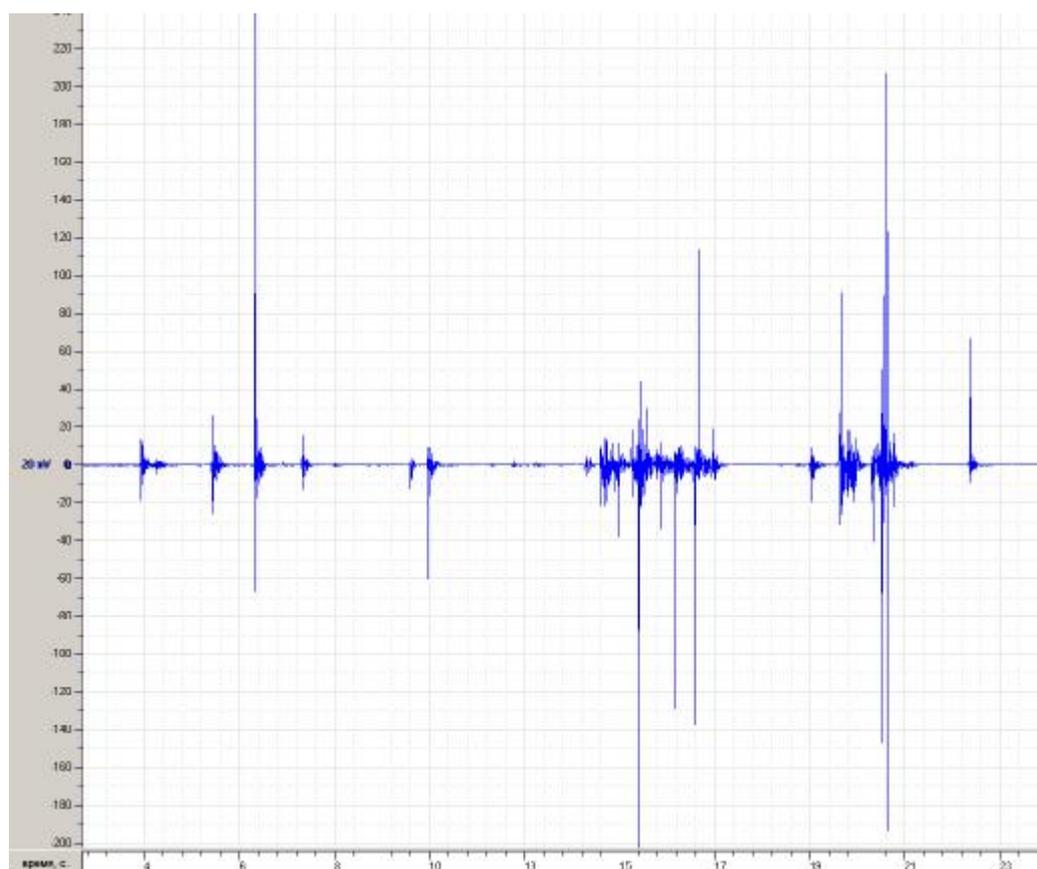


Рисунок 8. ЭМ импульсы, возбуждаемые образцом кварца при постепенном нагружении

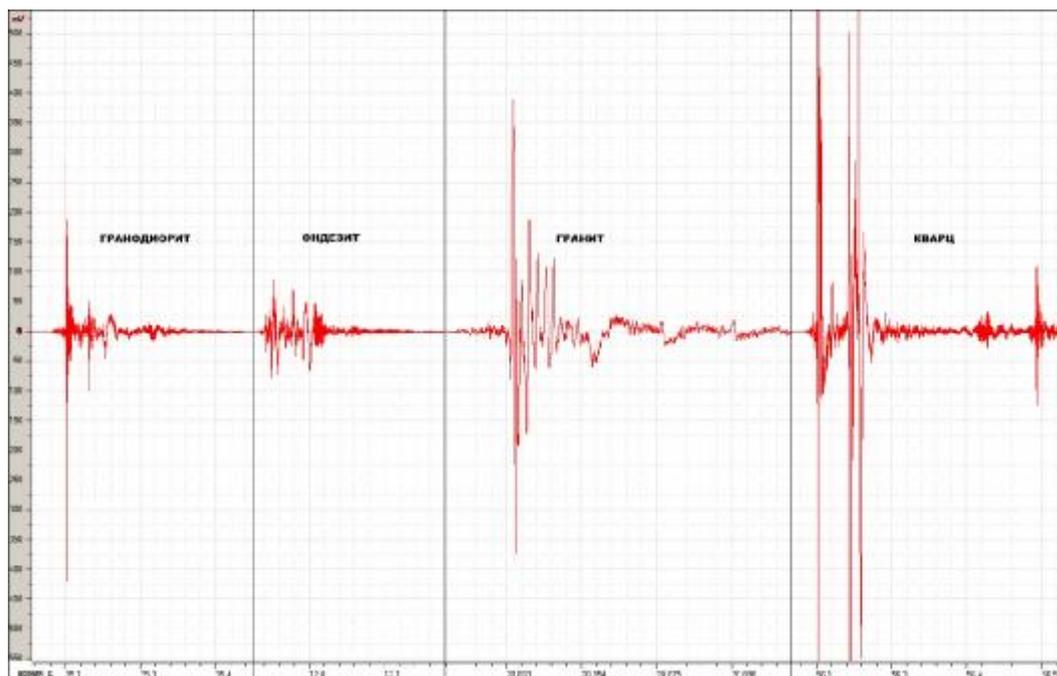


Рисунок 9. Амплитуда отдельно взятых ЭМ импульсов, возбуждаемых при постепенном нагружении образцов различных горных пород

При трещинообразовании образцов с пьезоэлектриком происходила резкая релаксация напряжённого состояния, что приводило к механической поляризации диэлектрика и, как следствие, возникновению ЭМ излучения. Далее такой процесс повторялся до полного разрушения объекта. Было установлено, что с уменьшением размеров образцов уменьшалась не только амплитуда возбуждаемого ЭМ излучения, но и изменялся его спектральный состав.

ЭМ импульсы, возникающие при нагружном и ударном воздействии, характеризуются резким фронтом. При этом ему предшествует постепенное возрастание ЭМ излучения, которое при ударном воздействии связано со сближением ударника с антенной, и при нагружном воздействии - с нарастанием упругой энергии внутри образца. Далее ЭМ импульсы постепенно затухают. Несмотря на сходство формы огибающей обоих сигналов, они отличаются по спектральному составу. Так, при ударном

воздействии возбуждаются ЭМ волны до 22 кГц а при постепенном нагружении - преимущественно до 6 кГц.

На рисунке 10 видно, что до и после импульса наблюдаются флуктуации уровней сигнала в широком диапазоне частот. Импульс здесь совпадает с моментом образования крупной трещины в образце кварца.

При нагружении образцов гранита заметных изменений в амплитуде ЭМ сигнала до момента образования крупных трещин нет, но, как и в случае с образцами кварца, амплитудные флуктуации на различных частотах проявляются после образования трещины. При нагружении образца гранодиорита вариации амплитуд на различных частотах присутствуют только после трещинообразования, но в менее выраженной форме, чем при давлении образцов гранита.

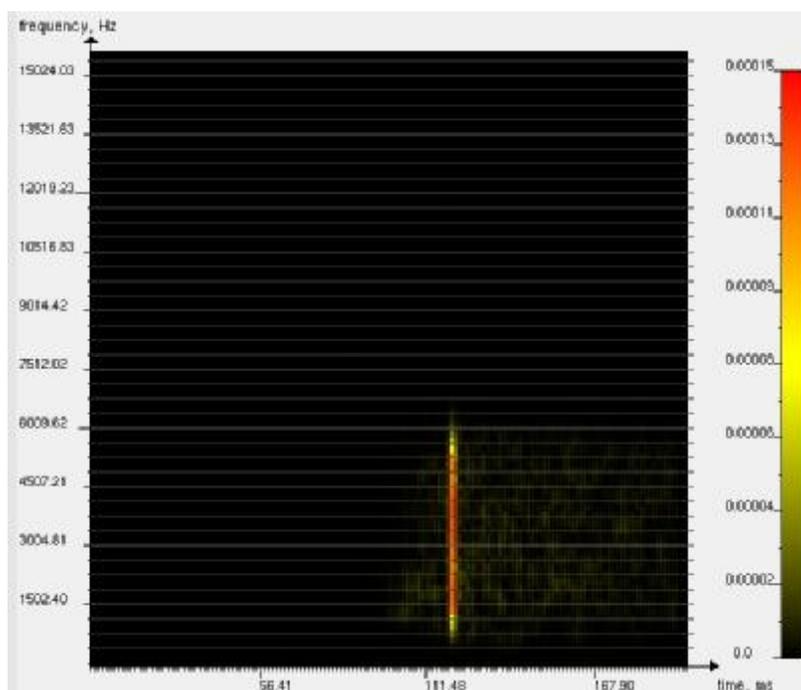


Рисунок 10. ЭМ импульс, возбуждаемый образцом кварца в момент образования трещины в результате постепенного нагружения

Основные результаты

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что электрическое сопротивление изменяется в результате ударного воздействия, зависит от числа ударов и от наличия или отсутствия проводящей жидкости в порах образца.

Характеристики и количество ЭМ импульсов, регистрируемых при статическом нагружении образцов, варьируют в зависимости от типа и размера исследуемого объекта.

Формы ЭМ импульсов при ударном и статическом воздействии имеют некоторое сходство, но сильно отличаются по спектру.

Количество, амплитуда и спектральный состав ЭМ импульсов, возбуждаемых при постепенном нагружении, зависят от размеров образцов и их состава.

В результате спектрально-временного анализа установлены следующие особенности ЭМ сигналов, возбуждаемых при динамическом воздействии на образцы горных пород:

- сразу после удара амплитуда ЭМ сигнала в области высоких частот резко уменьшается, далее происходит постепенное затухание сигнала на частотах ниже 6 кГц.
- при ударном воздействии на образцы гранита и гранодиорита основная доля энергии ЭМ импульса приходится на область области 0 – 6 кГц (за исключением нескольких образцов); для кварца – 0 – 22 кГц
- при постепенном нагружении образцов горных пород в момент образования крупных трещин генерируется ЭМ импульс в широком диапазоне частот (0-6 кГц). Непосредственно перед импульсом и сразу после него присутствуют амплитудные флуктуации, также лежащие в широком диапазоне частот.

Полученные экспериментальные данные о характере и ЭМ излучения образцами горных пород при динамическом воздействии, в общем, со-

ответствуют результатам наблюдений за изменением естественного электромагнитного поля Земли в ОНЧ диапазоне на территории Магаданской области при подготовке сейсмических событий, в процессе которых были выделены в первом приближении краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений [21].

Литература

1. Астафьева Э.И., Афраимович Э.Л. Ионосферные возмущения, вызванные землетрясением 26 декабря 2004 г. Вблизи о. Суматра (по данным глобальной сети GPS). <http://bsfp.iszf.irk.ru/bsfp2005/texts/Astafieva1.pdf> (дата обращения 13.06.2012), электронный ресурс.
2. Гохберг М.Б. и др. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 176 с.
3. Электрические и магнитные предвестники землетрясений. Ташкент: Фан, 1983. 136 с.
4. Eftaxias K. and others. Experience of short term earthquake precursors with VLF–VHF electromagnetic emissions // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2003. № 3. P. 217–228.
5. Rozhnoi A. and others. Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004. № 29. P. 589–598.
6. Hayakawa M., and others. A network of reception of over-horizon VHF signals associated with earthquakes and some preliminary results // *Journal of Atmospheric Electricity*. 2005. Vol. 25. №1. P. 19–28.
7. Шарафутдинов В.М., Кабанов В.В. Разработка и создание региональной сети электромагнитного мониторинга землетрясений в ОНЧ-диапазоне на Северо-Востоке России // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2007. № 3. С. 10–16.
8. Дружин Г.И. и др. Регулярный шумовой фон в ОНЧ излучении и мировые очаги гроз // *Геомагнетизм и Аэронавигация*. 1986. № 2, т. 26. С. 258–265.
9. Дружин Г. И. Электромагнитные предвестники землетрясений в ОНЧ излучении. // *Материалы ежегодной конференции, посвящённой дню вулканолога. Тез. докл.* Петропавловск-Камчатский: ДВО РАН ИВГИГ. 2003. С. 186–190.
10. Санников Д. В., Дружин Г. И. Аномальные явления в электромагнитном ОНЧ излучении перед сейсмическими событиями на Камчатке // *Солнечно-Земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: Сборник докладов; ИКИР ДВО РАН*. с. Паратунка, Камчатская обл., 2004. С. 120–130.
11. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности. Их возможная связь с движением ядра Земли // *Геология и геофизика*. 2009. № 2, т. 50. С. 152–171.
12. Ловцов С.В., Пономарёв Е.А. О некоторых механизмах электрической релаксации трещин // *Исследования по поискам предвестников землетрясений в Сибири: Сборник научных трудов; СО ИЗК АК СССР*. Новосибирск: Наука, 1988. С. 24–29.
13. Нейштадт Н.М. и др. Пьезоэлектрический метод разведки (методические рекомендации). Л.: ОНТИ ВИТР, 1972. 100 с.
14. Соболев Г.А., Демин В.М. Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. 246 с.
15. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 320 с.

16. Малышков Ю.П. и др. Влияние литосферных процессов на формирование импульсного электромагнитного поля Земли, прогноз землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 92-104.

17. Идармачев Ш.Г. и др. Исследования геоэлектрической модели очага землетрясения // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. 2007. т. 5. С. 247.

18. Жеребцов И.П. Радиотехника. М.: Связь, 1965. 656 с.

19. Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М. Корреляционные связи электрических свойств горных пород и рудной минерализации на месторождении Наталка // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2011. № 2. С. 30-33.

20. Суржиков А.П., Фурса Т.В. Механоэлектрические преобразования при упругом ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов // Журнал технической физики. 2008. т.78, вып. 4. С. 71-75.

21. Шарафутдинов В.М., Кабанов В.В. Сеть региональных станций электромагнитного мониторинга землетрясений на территории магаданской области: аппаратное обеспечение и методика обработки // Экологический риск и экологическая безопасность: Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием; Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. Иркутск, 2012. С. 139-141.

22. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1972. 152 с.