

УДК 550.383

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2010 г. А.А. Хромов, Р.А. Лементуева, Е.Л. Ирисова

*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Исследованы вариации кажущегося электрического сопротивления  $\rho_k$  и кажущейся поляризуемости  $\eta_k$  при нагружении и разрушении образцов горных пород в лаборатории и их целиков в шахте рудника Карнасурт на Кольском полуострове. Перед разрушением объектов обнаружены характерные изменения исследуемых параметров, которые объясняются перераспределением тока при возникновении электрических неоднородностей внутри них.

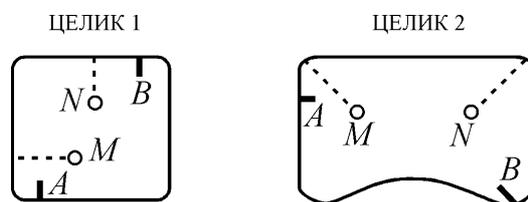
**Ключевые слова:** кажущееся электрическое сопротивление, кажущаяся поляризуемость, нагрузка, разрушение, целики.

### Введение

Метод вызванной поляризации широко применяется при изучении электрических свойств горных пород. Полевые исследования свидетельствуют о высоком уровне кажущейся поляризуемости  $\eta_k$  в зонах повышенной минерализации слоев горных пород в природных условиях [Поляков, 1951; Комаров, 1980]. Моделирование на образцах горных пород при создании сложноподвиженного состояния показало возможность изучения электрических аномалий на ранней стадии деформирования [Соболев, Лементуева, Гвоздев, 2003]. Все это делает исследование поляризуемости весьма интересным при изучении предвестников землетрясений.

### Методика наблюдений

Исследования кажущегося электрического сопротивления ( $\rho_k$ ) и кажущейся поляризуемости ( $\eta_k$ ) были проведены на руднике Карнасурт (Кольский п-ов) на двух целиках нефелиновых сиенитов, включающих рудный пласт лопаритов (руды редкоземельных металлов). Целик 1 имел поперечные размеры 5.5×5.5 м, целик 2 – 7.6×5.5 м; высота обоих целиков составляла 0.7 м (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема расположения электродов на поверхности целиков 1 и 2. *A, B* – токовые электроды, *M, N* – приемные

При наблюдениях использовались две четырехэлектродные установки *AMNB*. В качестве питающих электродов *A, B* применялись медные штыри длиной 0.5 м и диаметром 15 мм, в качестве приемных *M, N* – хлорсеребряные неполяризующиеся электроды типа ЭВЛ. Измерения выполнялись самопишущим потенциометром КСП-4 с согласующим блоком (автокомпенсатор АЭ-72) и стабилизатором тока.

Стабилизированный с точностью 0.5% постоянный ток включался в линию  $AB$  в виде однополярных импульсов длительностью 6 мин. Измерения разности потенциалов в линии  $MN$  начинались через 12 с после включения тока. К обработке принимались результаты измерений, полученные в интервалы наблюдений, когда отсутствовали сильные промышленные помехи, что объясняет неравномерность их распределения по времени. Точность измерений определялась погрешностью потенциометра КСП-4 (2.5%), в пределах которой и находились фоновые колебания вариаций  $\rho_k$  и  $\eta_k$  до взрывов и спустя несколько часов после них.

Изменение напряженно-деформированного состояния исследуемых целиков достигалось путем подрыва соседних целиков горных пород. При этом нагрузка на целики увеличивалась вплоть до превышения расчетного предела прочности.

В процессе изменения напряженно-деформированного состояния целиков изучались вариации кажущегося электрического сопротивления ( $\Delta\rho_k$ ) и кажущейся поляризуемости ( $\Delta\eta_k$ ), которые далее для краткости будем называть сопротивлением и поляризуемостью. Анализировались относительные изменения параметров в процентах от начального уровня, как это принято в электроразведке при оценке интенсивности [Блох, 1962].

Заметим, что для стационарного расположения установки  $AMNB$  при стабилизированном токе относительные вариации  $\Delta\rho_k$  равнозначны вариациям напряжения в измерительной линии  $MN$ :

$$\Delta\rho_k = [(V_i - V_0)/V_0] \cdot 100\%; \quad \Delta\eta_k = [(V_2 - V_1)/V_1] \cdot 100\%,$$

где  $V_i$  и  $V_0$  – омическое падение напряжения в линии  $MN$  (при включении тока) в текущий момент измерений и в начале эксперимента ( $V_0$  равно 400 мВ для целика 1 и 380 мВ для целика 2);  $V_1$  и  $V_2$  – разности потенциалов в линии  $MN$  через 12 с и 312 с. после начала пропускания тока для целика 1 и через 108 с и 360 с для целика 2. Указанные моменты в условиях данного эксперимента определялись техническими возможностями регистрации с прибором КСП-4.

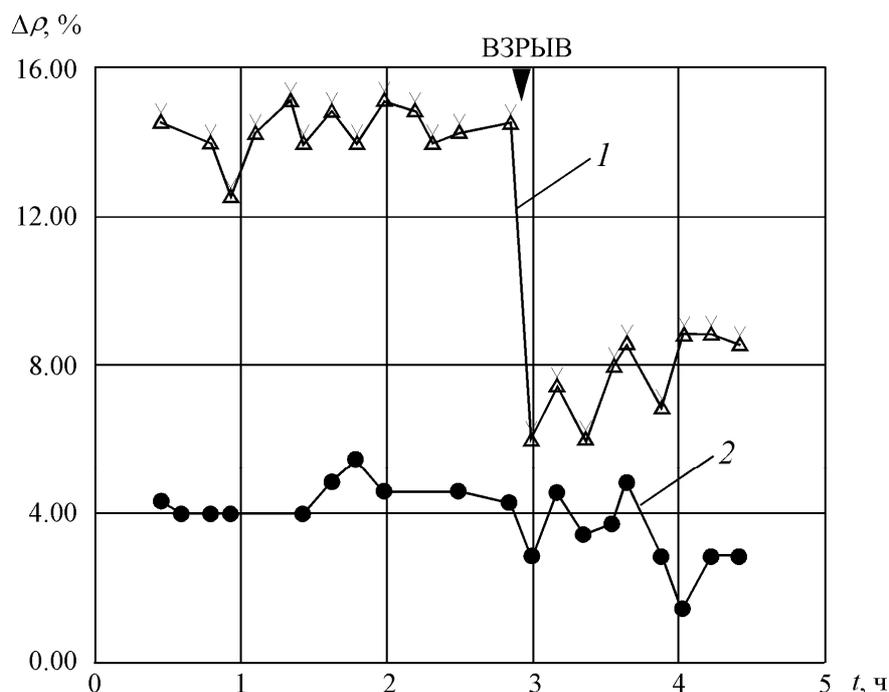
Отметим, что в данном случае термин ”поляризуемость” несколько условен, так как в разности ( $V_2 - V_1$ ) исключаются принадлежащие к основным два вида поляризации – активационная и химическая, – соответствующие перенапряжениям разряда и адсорбции с временем релаксации в пределах 1 с. При этом возможно проявление концентрационной поляризации, связанной со структурой, трещиноватостью и пористостью породы [Комаров, 1980], время релаксации которой может достигать нескольких минут. Кроме того, напряжение, измеряемое через 12 и 108 с после начала пропускания тока, включает в себя поляризационную составляющую, приводящую в случае убывания напряжения на измерительных электродах во время пропускания тока к занижению величины  $\rho_k$  (и завышению  $\eta_k$ ), а в случае его возрастания – к завышению  $\rho_k$  (и занижению  $\eta_k$ ).

В связи с изложенным результаты эксперимента имеют феноменологическое значение и не могут быть использованы для строгих количественных оценок.

## Результаты

Отметим, что кажущиеся сопротивление и поляризуемость ( $\rho_k$  и  $\eta_k$ ) прямо связаны с плотностью тока в зоне измерительных электродов, которая, в свою очередь, зависит от распределения электрических неоднородностей в других частях целика.

Эксперимент с нагружением целиков выполнялся в два этапа. На первом (предварительном) этапе в 1986 г. был произведен один взрыв (06.04.1986 г.), сразу после



**Рис. 2.** Вариации кажущегося электрического сопротивления при взрыве 06.04.1986 г.  
1 – целик 1, 2 – целик 2

которого в целике 1 произошло ступенеобразное уменьшение на 10% значения  $\rho_k$  и отмечено начало его последующего плавного возвращения предположительно к исходному уровню (рис. 2). В целике 2 при этом взрыве подобных аномальных вариаций обнаружено не было, что может свидетельствовать о разном уровне нагружения целиков. Измерения вызванной поляризации на этом этапе эксперимента не проводились.

На втором этапе эксперимента в 1987 г. последовательно были произведены два взрыва – 05.04.1987 г. и 07.04.1987 г. Измерения  $\rho_k$  и  $\eta_k$  выполнялись на поздних (12–312 с) временах пропускания тока. Результаты наблюдений приведены на рис. 3.

Наиболее значительные аномальные изменения  $\rho_k$  и  $\eta_k$  отмечались непосредственно после взрывов (в промежуток от 3 мин до 20 мин). При первом взрыве (рис. 3, А) наблюдаемые вариации обоих параметров сопровождалось последующим восстановлением исходного уровня. В целике 1 эти вариации проявились сильнее (10%), чем в целике 2 (2–3%), что, вероятно, указывало на большую нагруженность целика 1.

Нагружение, вызванное вторым взрывом, в обоих целиках сопровождалось более сильными знакопеременными изменениями  $\rho_k$  и  $\eta_k$  (рис. 3, Б), отражающими сложную динамику перераспределения механических напряжений внутри целиков в первые часы после взрыва. В целике 2 наблюдались более интенсивные изменения обоих параметров, чем при первом взрыве. В первые три часа после взрыва величина  $\eta_k$  уменьшилась на 6%, понижение  $\rho_k$  составило 20%. В течение следующих 20 часов эти параметры плавно вернулись к исходному уровню.

В целике 1 после второго взрыва произошло необратимое увеличение и  $\rho_k$  (до 27%), и  $\eta_k$  (до 10%). Целик потерял несущую прочность и расслоился по субвертикальным трещинам (по данным комплексных наблюдений за деформациями, скоростями упругих волн, акустической и электромагнитной эмиссии). Отрицательные значения кажущейся дифференциальной поляризуемости в целике 1 свидетельствуют о том, что измеряемое напряжение в линии  $MN$  убывает в процессе пропускания тока.

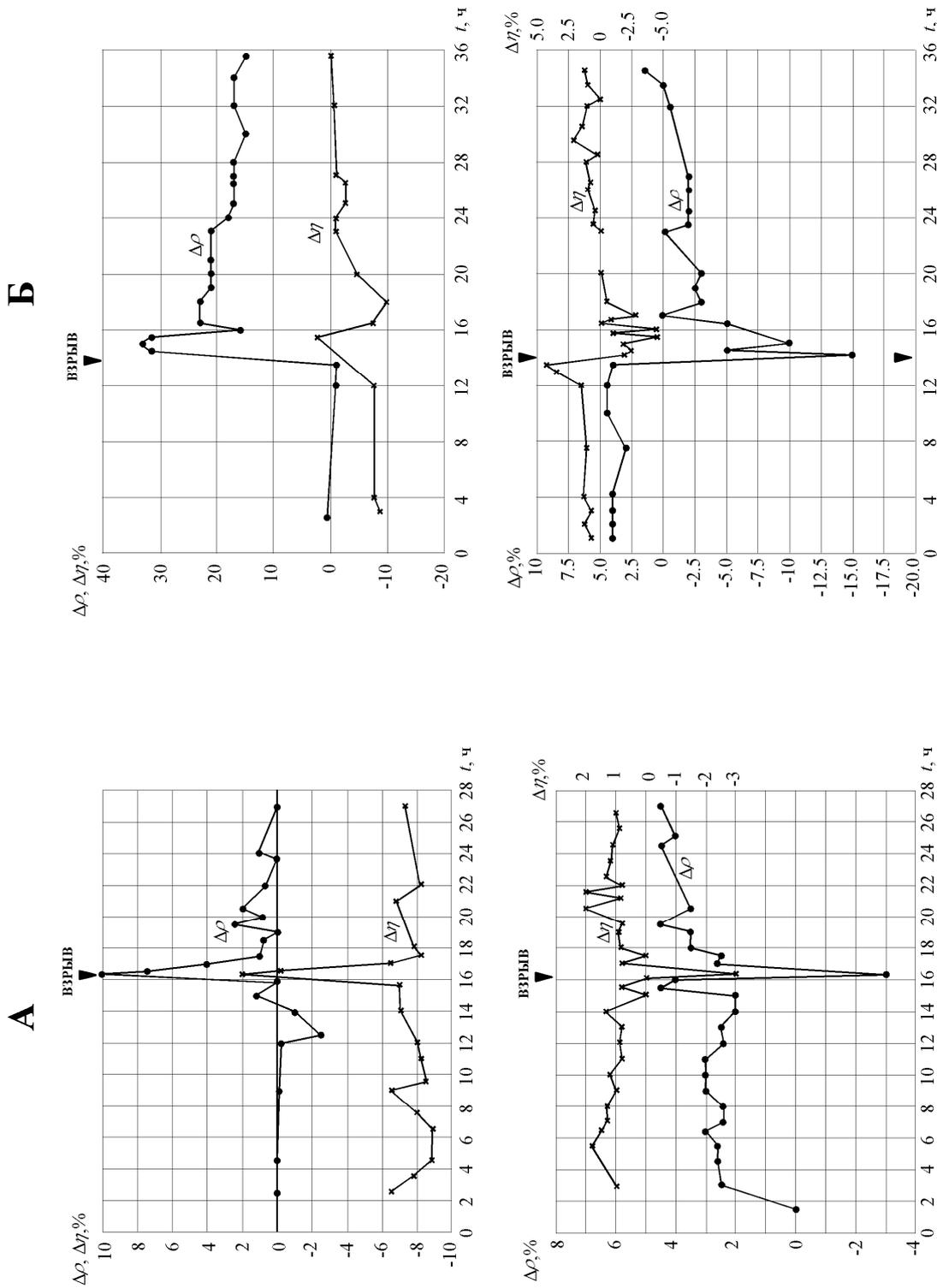


Рис. 3. Вариации электрических параметров при взрывах 05.04.1987 г. (А) и 07.04.1987 г. (Б) в цепиках 1 (вверху) и 2 (внизу)

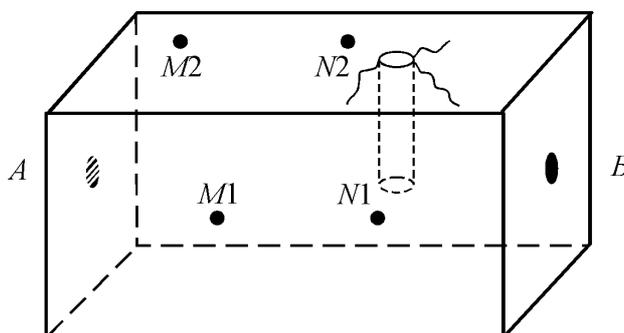
Подобный эффект может наблюдаться, когда измерительные электроды расположены над слабополяризуемыми породами [Поляков, 1951; Комаров, 1980].

Следует заметить, что при первом нагружении (в 1986 г.) в целике 1 значение  $\rho_k$  уменьшалось, а при двух последующих (в 1987 г.) – увеличивалось. В целике 2 при обоих нагружениях в 1987 г. происходило уменьшение  $\rho_k$ . На этом основании можно предположить, что состояние целика 2 при последнем нагружении в 1987 г. соответствовало состоянию целика 1 в период самого первого нагружения (1986 г.).

### Лабораторный эксперимент

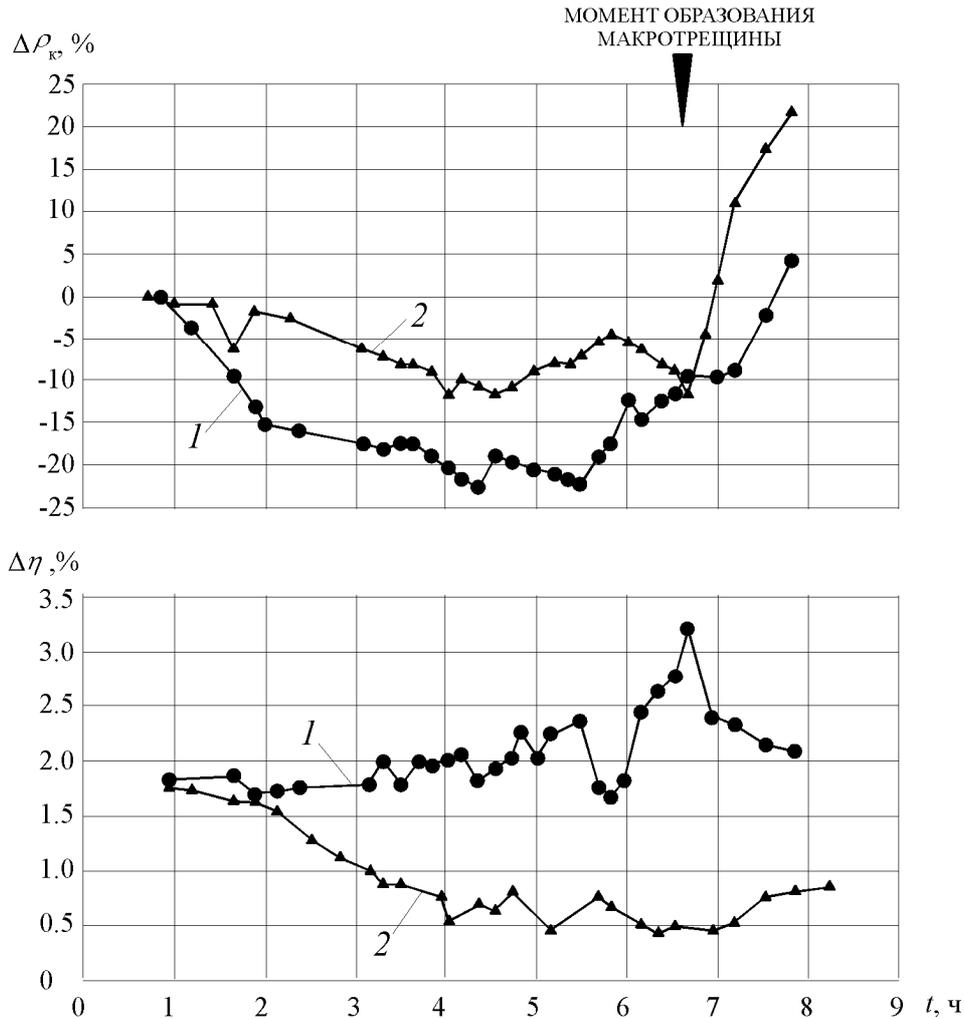
На более мелком масштабном уровне исследования вариаций электрических параметров при нагружении проводились в лабораторных условиях на образце пиррофиллита природной влажности размером  $10 \times 10 \times 20$  см. Водный раствор невзрывной разрушающей смеси (НРС) помещался в шпур диаметром 8 мм и глубиной 50 мм (рис. 4). Разрушение образца происходило в течение 6–12 ч в результате образования источника внутреннего напряжения, возникающего при реакции гидратации НРС, сопровождающейся увеличением объема [Соболев, Лементуева, Гвоздев, 2003].

Кажущиеся электрическое сопротивление  $\rho_k$  и поляризуемость  $\eta_k$  измерялись на низкой частоте ( $f=2-9$  Гц) [Лементуева, 1985]. Ожидалось, что вариации исследуемых параметров будут зависеть от местоположения измерительных электродов; поэтому они были установлены в зонах с предположительно разной интенсивностью трещинообразования (см. измерительные линии  $M1N1$ ,  $M2N2$  на рис. 4).



**Рис. 4.** Схема электрических измерений при разрушении образца пиррофиллита.  $A$ ,  $B$  – питающие электроды,  $M$ ,  $N$  – измерительные. Анализировались результаты, полученные при двух от разных положениях измерительных линий: вне зоны трещинообразования –  $M1N1$ , внутри нее –  $M2N2$ . Диаметр шпура для НРС – вне масштаба

На стадии подготовки макротрещин независимо от расположения измерительных электродов наблюдалось падение сопротивления  $\rho_k$  (рис. 5, вверху). Перед возникновением макротрещин характер поведения  $\rho_k$  менялся в зависимости от места установки приемных электродов – внутри зоны трещинообразования ( $M2N2$ ) происходило возрастание  $\rho_k$ , вне этой зоны ( $M1N1$ ) отмечено понижение  $\rho_k$ . Кажущаяся поляризуемость  $\eta_k$  (рис. 5, внизу) убывала при установке электродов в зоне трещинообразования ( $M2N2$ ) и повышалась при расположении электродов за ее пределами ( $M1N1$ ). Отмеченное локальное уменьшение  $\eta_k$  в зоне электродов  $M1N1$  за час до возникновения макротрещины, возможно, объясняется образованием области закрытой пористости с повышенной поляризуемостью между питающим электродом  $B$  и измерительным электродом  $N1$ , которая в дальнейшем исчезла при укрупнении трещин.



**Рис. 5.** Вариации  $\rho_k$  (вверху) и  $\eta_k$  (внизу) при разрушении образца пиррофиллита с помощью жесткого включения. Результаты измерений при двух разных положениях измерительных электродов: 1 – вне зоны интенсивного трещинообразования (электроды  $M1N1$  на рис. 4); 2 – внутри нее (электроды  $M2N2$ )

### Обсуждение

Отметим, что кажущиеся сопротивление и поляризуемость прямо связаны с плотностью тока в зоне измерительных электродов, которая, в свою очередь, зависит от распределения электрических неоднородностей в других частях целика.

Отмеченные аномальные эффекты объясняются тем, что на относительно ранней стадии нагружения непосредственно после взрыва по всему объему целика активизируется процесс трещинообразования, приводящий к уменьшению значений  $\rho_k$  и  $\eta_k$ . Затем в течение нескольких часов происходит перераспределение нагрузки между соседними целиками. В результате этого перераспределения исследуемый целик отчасти возвращается к начальному состоянию – происходит релаксация параметров  $\rho_k$  и  $\eta_k$ . На следующей стадии нагружение целика приводит к образованию макротрещин в его периферийных частях и раскрытию микротрещин в средней зоне. За этим следует перераспределение тока внутри целика и увеличение его плотности ( $\rho_k$ ) в центральной области (в зоне электродов  $MN$ ). В дальнейшем под воздействием нагрузки, близкой к предель-

ной, в центральной зоне происходит объединение микротрещин, сопровождающееся увеличением электропроводности, что приводит к относительному уменьшению  $\rho_k$  и  $\eta_k$ .

На последней стадии нагружения наблюдается разрушение периферийных частей целика 1, приводящее к резкому возрастанию плотности тока в его центральной части и необратимому увеличению  $\rho_k$  и  $\eta_k$ .

Общий характер вариаций  $\rho_k$  в целике 2 при последнем взрыве (07.04.1987 г., см. рис. 3, Б, внизу) аналогичен вариациям  $\rho_k$  в целике 1 при взрыве 26.04.1986 г. (см. рис. 2), когда тот еще не потерял несущей прочности. На этом основании можно сделать вывод, что целик 2 после взрыва 07.04.1987 г. сохранил несущую прочность

Полученные результаты дают основание полагать, что структурные изменения при нарушении сплошности среды приводят к изменениям поровой структуры и соответствующих электрокинетических процессов при пропускании тока, которые проявляются, прежде всего, в повышении поляризуемости в зоне трещинообразования.

### Выводы

1. При нагружении вплоть до разрушения как целиков горных пород в горной выработке, так и их образцов при лабораторных экспериментах наблюдаются значительные аномальные вариации электрического сопротивления и поляризуемости.

2. Комплексные исследования вариаций параметров  $\rho_k$  и  $\eta_k$  могут быть полезными при изучении напряженного состояния целиков горных пород.

### Литература

- Блох И.М.* Электропрофилирование методом сопротивлений. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 240 с.
- Комаров В.А.* Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. 391 с.
- Лементуева Р.А.* Измеритель поляризуемости горных пород и применение его в лабораторных и режимных полевых условиях / Режимные геофизические наблюдения. М.: Гарм, 1985. С.219–227.
- Поляков А.С.* К вопросу о вызванных электрических потенциалах в горных породах // Геофизические методы поисков полезных ископаемых. Л.: Госгеолиздат, 1951. С.31–38.
- Соболев Г.А., Лементуева Р.А., Гвоздев А.А.* Динамика механоэлектрических параметров в образцах горных пород при внутреннем источнике упругих напряжений // Моделирование геофизических процессов. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С.5–9.

#### *Сведения об авторах*

**ХРОМОВ Анатолий Алексеевич** – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 254-23-30.

**ЛЕМЕНТУЕВА Рита Ануфриевна** – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 254-23-40.

**ИРИСОВА Елена Леонидовна** – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 254-24-78. E-mail: leto@ifz.ru

## RESEARCH OF ELECTRIC PARAMETERS OF THE ROCK MASSIFS

A.A. Khromov, R.A. Lementueva, E.L. Irisova

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The subject of the research are variations of electric apparent resistivity ( $\rho_k$ ) and caused polarization ( $\eta_k$ ) under pressure and demolition (destruction) of rock massifs blocks in a mine along with the tests of the rock samples in laboratory. The research was carried out at the Karanasurt mines (Kola peninsula). Typical changes of these parameters were discovered before the blocks were destructed. This effect is explained by redistribution of electric current due to emerging of electric heterogeneity inside the tested blocks and rock samples.

**Keywords:** electric apparent resistivity, caused polarization, pressure, massifs block, stressed-deformed.