

УДК 622.83:620.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
МЕТОДОМ ИК-РАДИОМЕТРИИ**

А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, С.В. Моисеев*

Томский политехнический университет
*Таштагольский филиал ОАО «Евразруда»
E-mail: besko48@tpu.ru

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

E-mail: besko48@tpu.ru

Область научных интересов: геодинамика, электрические и магнитные свойства горных пород, механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах и горных породах, методы и приборы контроля природной среды.

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.

Моисеев Сергей Витольдович, ведущий инженер-геофизик Таштагольского филиала ОАО «ЕвразРуда», г. Таштагол.

E-mail: shtirts@gmail.com

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

Приведены результаты использования метода ИК-радиометрии для качественной оценки напряженно-деформированного состояния на различных участках массива горных пород Таштагольского рудника.

Ключевые слова:

Напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, ИК-радиометрия, температура поверхности, забой.

Контроль изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород на месторождениях полезных ископаемых склонных к горным ударам очень важен. Это обусловлено необходимостью обеспечения безопасности людей, окружающей среды, промышленных объектов и горных работ. Особенно актуальным является контроль НДС забоев проходок в массивах горных пород рудников и шахт. Развитие изменений НДС породного массива является следствием естественных процессов в земных недрах и техногенных воздействий. Особую важность приобретает знание характера и уровня влияния каждого из основных элементов и процессов технологии на состояние массива горных пород и его реакцию на это воздействие [1–5]. В рудниках с прочными породами при подземной отработке твердых полезных ископаемых используются технологические взрывы, вызывающие ускоренное перераспределение поля механических напряжений в горном массиве. В результате ускоренного изменения напряжений в массиве горных пород в шахтном поле могут возникать удароопасные ситуации.

Для мониторинга и контроля изменения НДС в настоящее время предложены и внедряются методики, основанные на использовании различных физических полей, появляющихся при изменении НДС массива горных пород в шахтном поле. Одним из результатив-

ных направлений является разработка методик, использующих активное или пассивное изменение электромагнитного поля в различных диапазонах частот. Переход различных видов энергии в энергию электромагнитного поля зависит от свойств взаимодействующих систем, поэтому в Томском политехническом университете ведутся лабораторные и натурные исследования

электромагнитных сигналов (ЭМС) диэлектрических структур и горных пород, возникающих вследствие механических и температурных воздействий на них. Эти исследования были начаты в Томском политехническом институте еще в начале 70-х гг. под руководством А.А. Воробьева. Затем в работах В.Н. Сальникова и А.А. Воробьева впервые было показано [6] возникновение ЭМС при нагревании образцов горных пород и минералов. Однако при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород наблюдается и изменение электромагнитного поля в инфракрасном (ИК) диапазоне. В работе [7] метод ИК-радиометрии применен для совершенствования способов выявления и диагностики вариаций напряженного состояния геоматериалов, основанных на использовании термодинамического эффекта изменения температуры тела при его деформировании. В работе [8] показано, что при механическом сжатии или растяжении, а также при разрушении в твердых телах возникают температурные градиенты, обусловленные процессами преобразования механической энергии в тепловую. Выделение тепла может происходить либо вследствие механического гистерезиса, либо за счет пластической деформации при возникновении и распространении трещин и разрушении. С ростом нагрузки происходит концентрация напряжений на микродефектах материала, что приводит, вначале, к появлению микротрещин, которые при достижении критического уровня нагрузки, объединяются в магистральные трещины, вызывающие разрушение материала [8].

В наших исследованиях необходимо было произвести измерение температуры на различных участках породного массива Таштагольской шахты и оценить возможность применения ИК-радиометрии для контроля НДС горных породах. Для решения поставленных задач были проведены измерения температурного поля поверхностей массива горных пород в выработках четырёх горизонтов Таштагольской шахты (таблица).

Таблица. Результаты измерения температуры методом ИК-радиометрии на разных горизонтах шахты Таштагольского рудника.

Места проведения замеров				Содержание и состояние замеряемых поверхностей, ограничивающих подземную полость, выработку (количество замеров)	Температура, С°	
Горизонт	Глубина от поверхности, м	Выработка	Поверхность		t _{мин}	t _{макс}
±0	620	Штрек №3	Северный борт	Анкерное крепление, нарушен борт в 1,5 м над почвой (5)	12,6	13,6
±0	457	Руддвор	Южный борт	Анкерное крепление и торкрет бетон (3)	13,8	14
-210	680	Орт 04	Северный борт	Руда богатая, борт частично закреплён (6)	14,7	16,8
-210	680	Орт 04	Южный борт	Руда богатая, борт частично закреплён (2)	12,5	14
-210	680	Орт 04	Забой	Руда богатая, забой отпален за 15 часов до замера (4)	15,3	17,3
-210	680	Орт 02	Забой	Руда богатая, забой отпален за 48 часов до замера (3)	16,2	16,5
-210	680	Орт 03	Забой	Руда богатая, работы в выработке не ведутся (3)	13,9	14,5
-210	680	Орт 03	Южный борт	Руда богатая, работы в выработке не ведутся (2)	13,5	13,9
-210	680	Орт 03	Северный борт	Руда богатая, работы в выработке не ведутся (3)	13,6	15,7
-280	780	Орт 7	Сопряжение с кроссингом	Бетонное крепление разрушено, обводнено (3)	19,5	20,0
-280	780	Орт 7	Сопряжение с кроссингом	Бетонное крепление сухое, ненарушенная часть (4)	18,5	19,6
-280	780	Орт 7	ВДПУ 5	Борт бетонного крепления под ВДПУ (2)	18,0	19,8
-280	780	Орт 7	ВДПУ 5	Кровля бетонного крепления над ВДПУ (1)	21,8	21,8

Продолжение таблицы						
-280	780	Орт 7	ВДПУ 5	Бетонное крепление; ВДПУ после её работы 40 мин (2)	19,8	20,8
-350	830	Орт 11	Забой	Пять разгрузочных скважин, пробуренных за семь суток до замера (9)	17,0	20,5
-350	830	Орт 11	Южный борт	Метасоматит, закреплена кровля, борт на 1,5 м (2)	18,3	19,5
-350	830	Орт 8	Забой	Руда, забой отпален за 8 часов до замеров, треск, заколы после орошения (4)	21,8	23,5

Замеры температуры поверхности проводили с использованием тепловизора IRISYS IRI 4010. Принцип действия камеры заключается в том, что ИК (тепловое) излучение от исследуемого объекта через оптическую систему передается на приемник, представляющий собой охлаждаемую матрицу фотодетекторов. Далее полученный видеосигнал посредством электронного блока измерения, регистрации и математической обработки оцифровывается и отображается на экране дисплея тепловизора. Камера, обладающая матрицей 160×120 элементов с температурной чувствительностью 0,15 °С и спектральным диапазоном от 8 до 14 мкм, обеспечивает измерение температуры от -10 °С до +250 °С. С помощью этой камеры фиксировали также дискретные отсчеты на отдельных участках одной и той же поверхности (борта, кровли, своды ограждающего крепления). В таблице приведены данные замеров минимальных t_{\min} и максимальных t_{\max} значений температур. Количество измерений указано в скобках. Всего произведено 57 замеров на горизонтах ±0, -210, -280 и -350 Таштагольского рудника. Измерение температуры в основном проводилось на поверхности выработок, сложенных горными породами. На горизонте -280 в орте 7 измерялись температуры поверхности бетонных бортов и свода ограждающего крепления в разной степени сохранности (частично нарушенное, обводнённое) из района рабочей вибрационной установки ВДПУ.

Анализируя данные, представленные в таблице, можно оценить изменение температуры поверхности подземных выработок и бетонных сооружений в них. Температура поверхности забоев выработок (орт 11 горизонта -350), которые находятся в активной проходке, несколько выше, чем температура поверхности бортов выработок (орты 02 и 04 горизонта -210). Поверхности забоев, которые отстаиваются, определенное количество времени после отпалки (разрушения взрывом) имеют меньшую температуру. Это орты 02, 03, 04 горизонта -210, орты 8, 11 горизонта -350. Поверхности бетонного крепления в районе работающей ВДПУ более нагреты, чем разрушенные участки бетона в нерабочей части выработки. Последние, в свою очередь, несмотря на обводнённость, более нагреты, чем рядом расположенные не обводненные участки бетона.

На рис. 1 приведены термоизображения забоев ортов 11 (рис.1, а) и 8 (рис.1, б) горизонта -350, полученные с помощью тепловизора IRISYS IRI 4010.

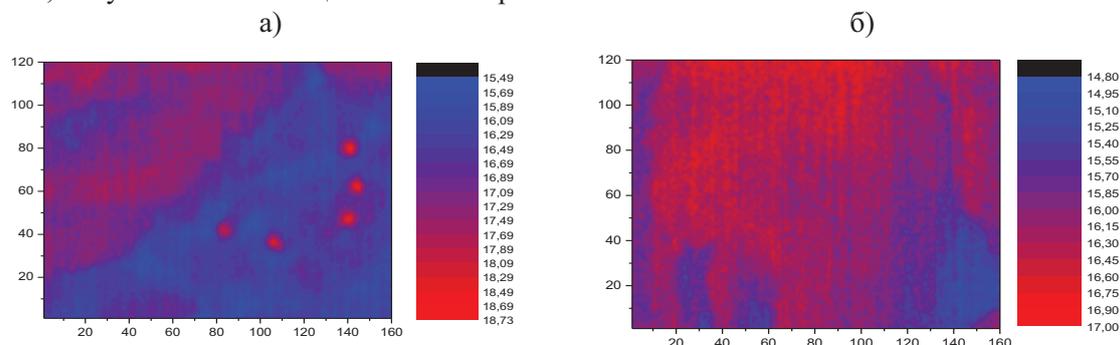
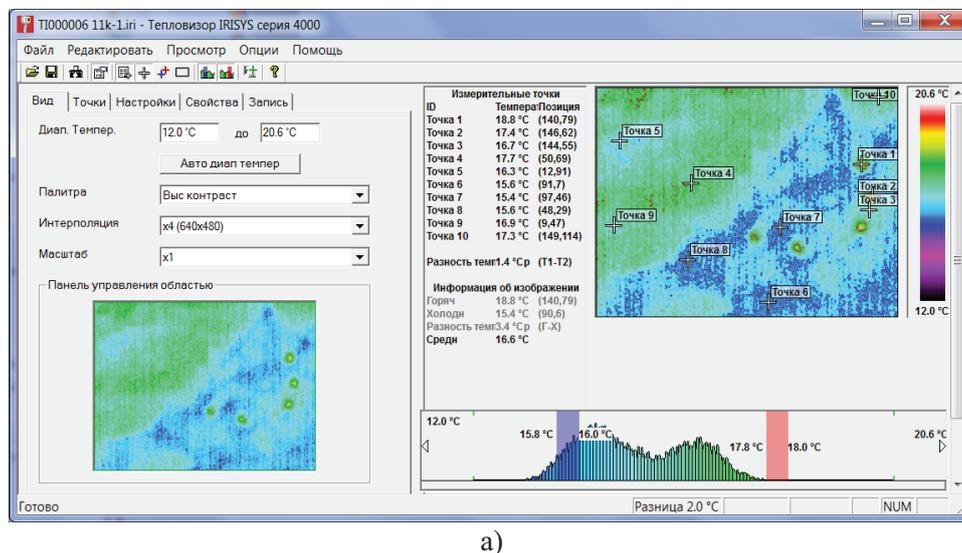


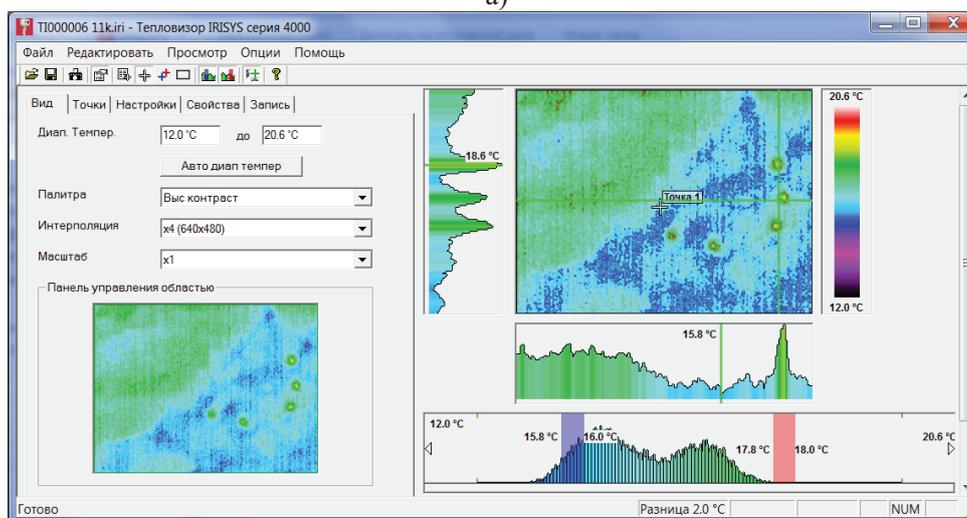
Рис. 1. Термоизображение поверхности забоя орта 11 горизонта -350 (а) после отстоя в течение 7 суток, а также поверхности забоя орта 8 горизонта -350 (б) через 8 часов после отпала и через час после орошения водой

На термограмме в забое 11 виден раздел блоков горного массива от 15,7 °С до 17,5 °С и с четко выделенными 5 круглыми пятнами с температурой около 18,8 °С. Пятна с повышенной температурой на плане забоя соответствуют расположению 5 скважин диаметром 106 мм и глубиной до 10 м, пробуренных за 7 суток до проводимых измерений. Скважины предназначены для разгрузки НДС горного массива в забое. Кроме того, в породном массиве в 8...10 метрах по ходу проходки орта 11 простирается горизонтальный разлом, который, вероятно, при проходящих в нем деформационных процессах и оказывает такое влияние на температурное поле в скважинах и в забое 11 орта в целом. На рис. 1, б приведено термоизображение забоя орта 8 на горизонте -350. Здесь ИК-радиометрический снимок сделан через 8 часов после отпалки забоя и частичной его очистки. Перед проведением очистных работ забой был орошен водой, в результате чего прошло выравнивание температур поверхности породного массива, которое сопровождалось звуковыми эффектами в виде треска и падения «заломов».

На рис. 2, а для наглядности в контрастном режиме, показаны температуры в разных точках забоя орта 11, которые отличаются на 3,4 °С, а на рис. 2, б изображены профили температур в этом же забое по произвольно выбранным горизонтальным и вертикальным направлениям. Четко видно, что места разгрузочных скважин характеризуются значительным повышением температуры.



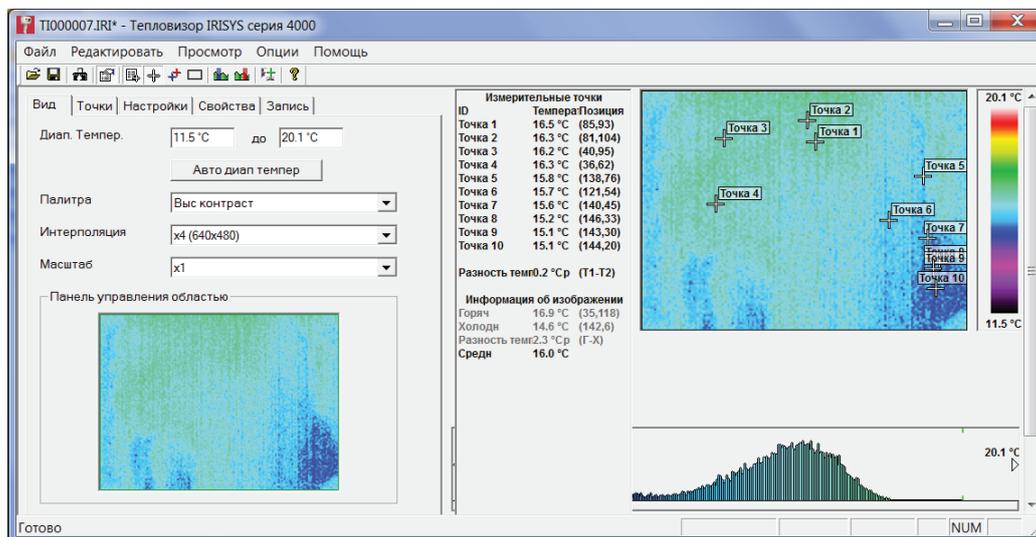
а)



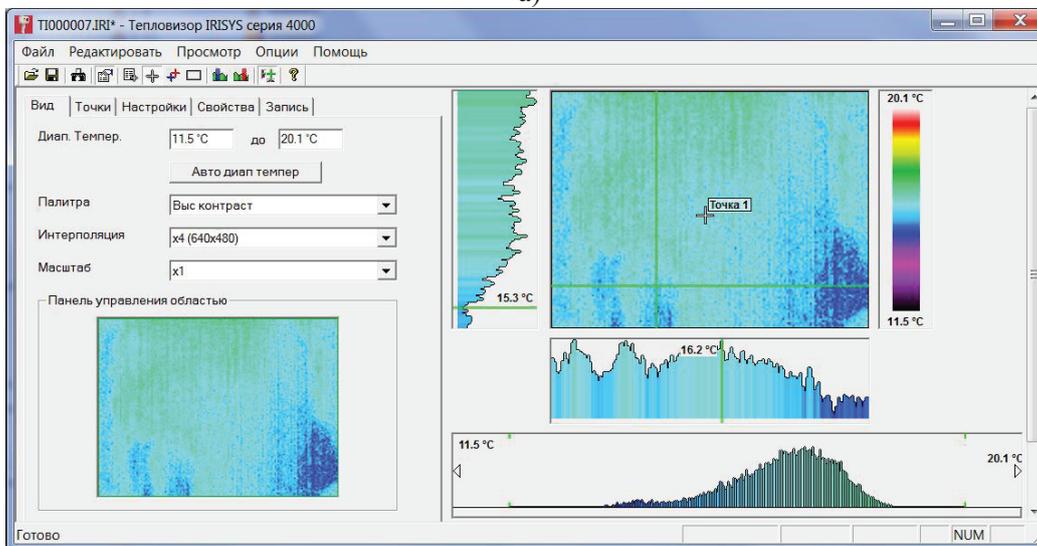
б)

Рис. 2. Контрастная визуализация температурного поля на поверхности забоя орта 11 горизонта -350 после отстоя в течение 7 суток: а) с точечным измерением температур; б) профили температур по горизонтали и вертикали

На рис. 3, а также для наглядности в контрастном режиме, показаны температуры в разных точках забоя орта 8, которые отличаются на величину всего в 1,4 °С, а на рис. 3, б изображены профили температур в этом же забое по произвольно выбранным горизонтальным и вертикальным направлениям. При этом температурное поле в верхней части забоя более равномерно, чем в его нижней части. Это, вероятно, обусловлено выполнением очистных работ непосредственно перед проведением ИК-радиометрии и неравномерным распределением НДС в основании забоя.



а)



б)

Рис. 3. Контрастная визуализация температурного поля на поверхности забоя орта 8 горизонта -350 через 8 часов после отпала и через час после орошения водой: а) с точечным измерением температур; б) профили температур по горизонтали и вертикали

Проведенные исследования показали, что в Таштагольском руднике температура поверхности горных пород увеличивается с понижением горизонта. На термограммах забоев и других частей проходок наблюдается градиент температур, при этом в скважинах, непосредственно примыкающих к «живущему» разлому, превышение температуры над минимальной достигает 3,4 °С. Повышение температуры и ее понижение, как показано в работах [7, 8], сопровождается изменениями НДС объекта. Таким образом, нами показана возможность контроля напряженно-деформированного состояния горных пород забоев проходок и породного массива с помощью метода ИК-радиометрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП по ГК № 16.515.11.5085

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: КузГТУ, АГН, 1999. – 257 с.
2. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам. – Новокузнецк: ВостНИГРИ, ВНИМИ, 1991. – 93 с.
3. Еременко А.А., Гайдин А.П., Ваганова В.А., Еременко В.А. О критерии удароопасности массива горных пород // ФТПРПИ. – 1999. – № 6. – С. 12–18.
4. Кузнецов Б.М., Трофимов В.А. Аномальные поля напряжений в окрестности тектонических напряжений // ФТПРПИ. – 2002. – № 6. – С. 3–11.
5. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Акинин А.А., Балмашнова Е.Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. – 1998. – № 5. – С. 16–33.
6. Воробьев А.А., Заводовская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов при физико-химических превращениях в них // Доклады АН СССР. – 1975. – Т. 220. – № 1. – С. 82–85.
7. Шейнин В.И., Мотовилов Э.А., Морозов А.А., Фаворов А.В. Идентификация напряжений в горных породах по изменению плотности потока инфракрасного излучения // ФТПРПИ. – 1999. – № 6. – С. 48–53.
8. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

Поступила 02.04.2012 г.