

УДК 622.02:620.1

**С.В. Вильямов, А.С. Вознесенский, В.В. Набатов,
В.Л. Шкуратник**

**ТЕРМОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ИЗВЕСТНЯКОВ
КАК ИНСТРУМЕНТ РАСПОЗНАВАНИЯ
ИХ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ КОНКРЕТНОМУ
МЕСТОРОЖДЕНИЮ ***

Приведены результаты экспериментальных исследований особенностей термоакустической эмиссии групп образцов известняка, полученных из двух различных месторождений. Показано, что, несмотря на внешнюю идентичность образцов, указанные особенности позволяют идентифицировать принадлежность каждой из них конкретному месторождению. Получены количественные оценки вероятности правильного распознавания принадлежности образцов известняка определенным месторождениям.

Ключевые слова: термоакустическая эмиссия, месторождения, известняк, идентичность образцов.

Семинар № 3

**S.V. Viliamov, A.S. Voznesenskiy,
V.V. Nabatov, V.L. Shkuratnik
THERMOACOUSTIC EMISSION OF
LIMESTONES AS THE TOOL OF THEIR
BELONGING TO THE SPECIFIC
DEPOSIT RECOGNITION**

Results of experimental researches of the thermo-acoustical emission features of the limestone samples groups received from two various deposits are described. It is shown that, despite external identity of the samples, the specified features allow to identify an belonging each of them to concrete deposit. Quantitative estimations of correct recognition probability of limestone samples belonging to certain deposits are given.

Key words: thermo-acoustical emission, described, limestone, identity of the samples.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 07-05-00045.

Основой методологии геологических наук при определении генотипа той или иной горной

породы в течении длительного времени оставались эмпирические обобщения и метод аналогий. Особенностью последних является, как известно, качественный характер получаемой с их помощью информации о составе и структуре, а через них и генотипе соответствующих геологических объектов. Со временем указанная информация стала дополняться количественными оценками, в качестве источников которых использовался целый комплекс методов изучения минерального вещества (химических, спектральных, рентгеноструктурных, микроскопических, люминисцентных, изотопных и ряда других). Относительно недавно к названным методам прибавился еще и метод термоакустической эмиссии (ТАЭ), заключающийся в регистрации и последующем анализе характерных для каждой конкретной горной породы параметров ее акустической эмиссии (АЭ) при нагревании образцов в относительно широ-

ком температурном диапазоне [1, 2]. При этом основным достоинством метода ТАЭ является его относительная простота и возможность реализации на образцах сравнительно малых размеров и неправильной формы.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на проверку гипотезы о возможности использования метода ТАЭ еще и для идентификации месторождения, которому принадлежит образец горной породы уже известного генотипа. В качестве предпосылок такой возможности выступает тот факт, что для однотипных горных пород разных месторождений характерны определенные отличия в минеральном составе, физико-механических и тепловых свойствах, а также структурных особенностях, дефектности и анизотропии. Причем именно с этими отличиями связаны специфические для каждой горной породы механизмы и масштабы деформирования и разрушения при нагревании, а значит и специфический характер возникающей в результате АЭ.

В качестве объекта исследования был выбран известняк – осадочная горная порода, состоящая в основном из кальцита и включающая в ряде случаев примеси глинистых минералов, доломита, кварца, реже гипса, пирита и органических остатков. Перечень и количество указанных примесей как правило индивидуальны для каждого месторождения, также как индивидуальны макро- и микроструктура известняка, его свойства и условия залегания. В то же время внешние признаки известняков могут совпадать, что с учетом универсального применения в промышленности, сельском хозяйстве и строительстве обуславливает интерес к

задаче идентификации места их происхождения.

1. Испытания образцов горных пород и получение зависимостей акустоэмиссионных параметров от температуры

Исследования АЭ при нагревании образцов известняков осуществлялись на лабораторной экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в [3]. Ее основой является трубчатая печь Nabertherm RT 50/250/11 с контроллером Р 320. Печь способна нагревать образцы до 1100°C с линейным во времени нарастанием температуры.

При испытаниях записываются температура нагревательной камеры печи T_{ov} и температура образца T_{sp} . При этом температура образца контролируется в двух местах. Горячие спаи термопар помещаются в отверстия, просверленные в образце на разных расстояниях от его нагреваемой поверхности.

Для регистрации АЭ используется акустоэмиссионная система A-Line 32D. Регистрация ведется в полосе частот 30-500 кГц с частотой дискретизации 2 МГц при записи полной формы сигнала. Преобразователи АЭ размещаются на концах кварцевых стержней, выходящих из печи и контактирующих с образцом. В процессе проведения опытов записываются сигналы АЭ, выделяемые по превышению амплитудного порога. Также определяются и другие параметры АЭ: активность АЭ (ААЭ), т. е. количество событий АЭ в секунду), количество пересечений порога регистрации, энергия, пиковые амплитуды сигналов АЭ и другие. Эти параметры регистрируются с частотой 1 Гц. Сигналы с преобразователей температуры через усилитель подаются на параметрические каналы системы A-Line 32D и оцифровываются с частотой 5

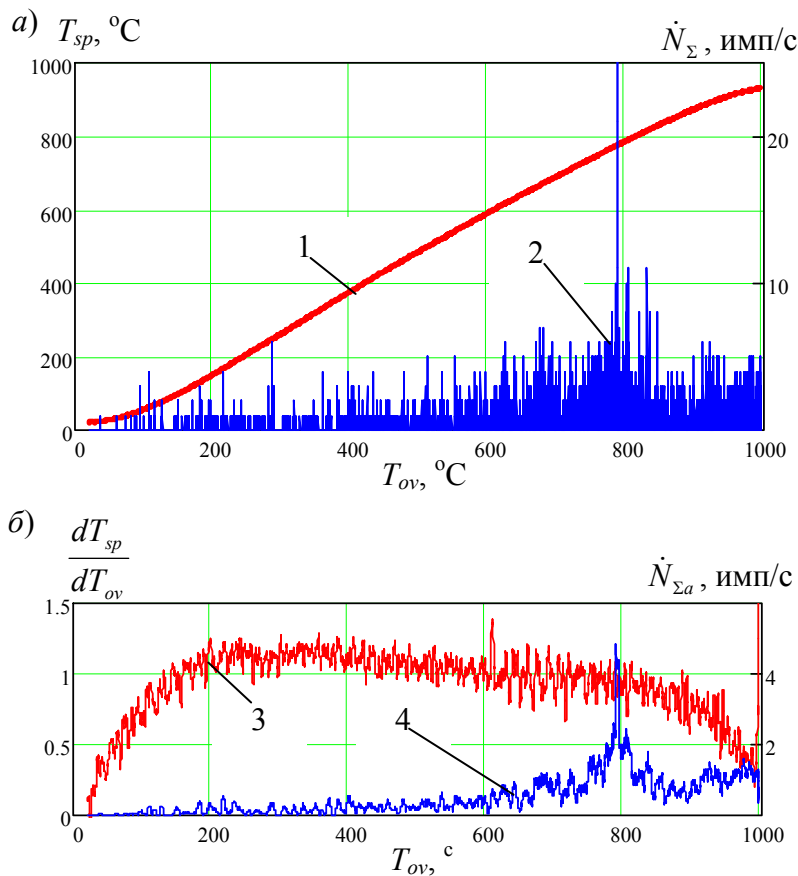


Рис. 1. Зависимости температуры образца T_{sp} (1), активности акустической эмиссии \dot{N}_{Σ} (2), производной температуры образца по температуре печи dT_{sp}/dT_{ov} (3) и усредненной величины активности акустической эмиссии $\dot{N}_{\Sigma a}$ (4) от температуры печи T_{ov} для образца №1 известняка Тигинского месторождения

Гц. Таким образом, производится совместная синхронная регистрация сигналов с датчиков АЭ и с датчиков температуры. Математическая обработка полученных данных ведется с помощью программ, написанных в среде Mathcad.

При испытаниях выдерживается один и тот же режим – нагревание ведется от температуры окружающей среды до 1000 °С за 100 мин. Таким образом, скорость увеличения темпе-

ратуры равна 9,8 °С/мин. и незначительно отличается от этой величины в зависимости от начальной температуры окружающей среды.

Для испытаний выбраны по 10 образцов известняка из двух месторождений: группа 1 из Тигинского месторождения (Краснодарский край) и группа 2 – нумуллитовый известняк (рудник «Южный», Крым). Примеры получаемых зависимостей представлены на рис. 1-3. На рис. 1 и рис. 2

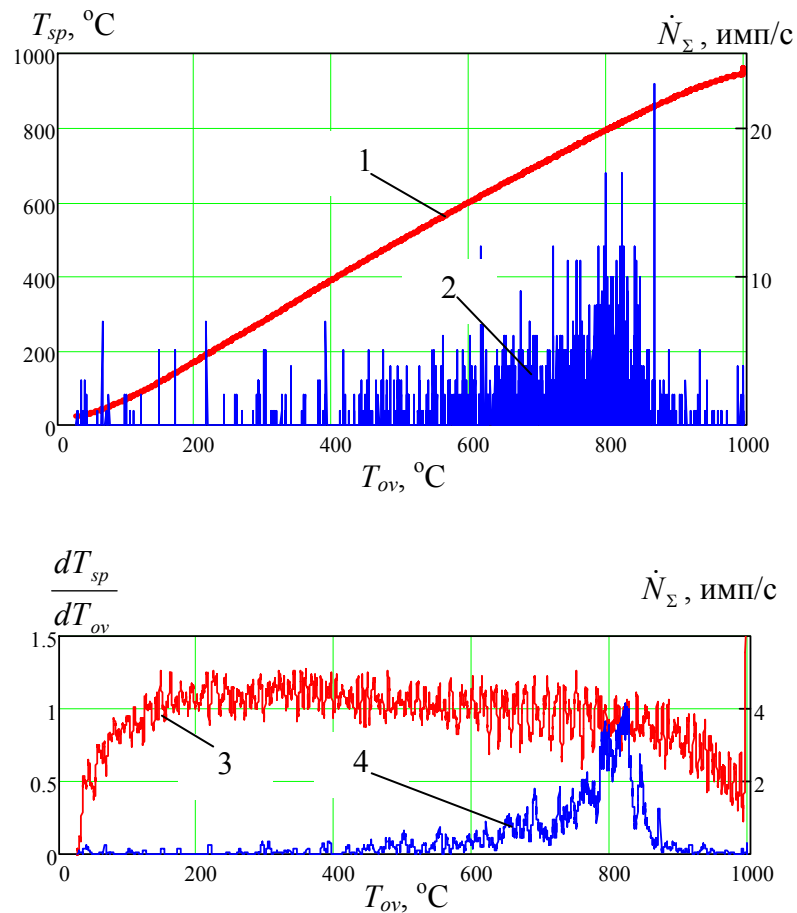


Рис. 2. Зависимости температуры образца T_{sp} (1), активности акустической эмиссии \dot{N}_{Σ} (2), производной температуры образца по температуре печи dT_{sp}/dT_{ov} (3) и усредненной величины активности акустической эмиссии $\dot{N}_{\Sigma a}$ (4) от температуры печи T_{ov} для образца №5 известняка Тигинского месторождения

для сравнения между собой показаны графики одной и той же группы образцов Тигинского месторождения, а на рис. 3 для сравнения зависимостей образцов из разных групп – нумуллитового известняка. Рассмотрим их более подробно.

Зависимости для образцов Тигинского месторождения (рис. 1, а и 2, а) демонстрируют схожие закономерности

изменения ААЭ \dot{N}_{Σ} , обозначенной на этих рисунках цифрой 2. Как для одного, так и для другого из этих образцов характерно плавное возрастание этого параметра в зависимости от температуры печи T_{ov} вплоть до температуры последней около 800 °С. После этого в целом наблюдается уменьшение \dot{N}_{Σ} . Чтобы более отчетливо проследить изменение хода тем-

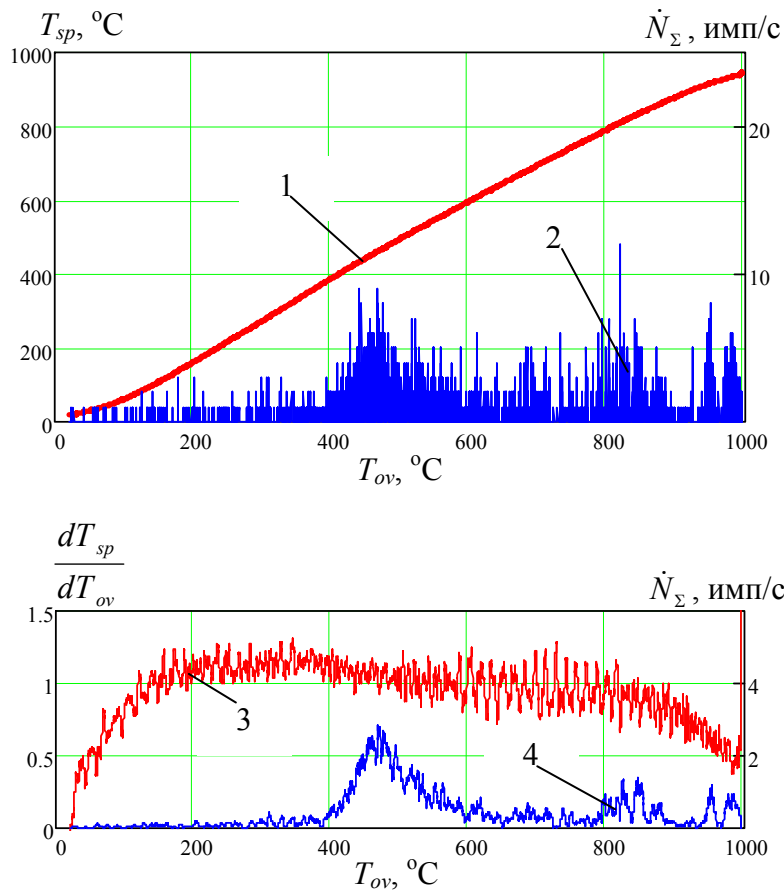


Рис. 3. Зависимости температуры образца T_{sp} (1), активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ (2), производной температуры образца по температуре печи dT_{sp}/dT_{ov} (3) и усредненной величины активности акустической эмиссии $\dot{N}_{\Sigma a}$ (4) от температуры печи T_{ov} для образца №5 нумуллитового известняка (Крым)

пературы образца T_{sp} , а также \dot{N}_Σ , на рис. 1, б и 2, б показаны графики производной температуры образца по температуре печи dT_{sp}/dT_{ov} и графика сглаженной величины ААЭ $\dot{N}_{\Sigma a}$. Сглаживание произведено скользящим средним с шириной окна, составляет 20 значений.

Таким образом, для известняков первой группы характерной является

область температур печи около 800 °С, в которой наблюдается максимум ААЭ.

Анализ зависимостей температуры образца от температуры печи $T_{sp}(T_{ov})$ и их производных позволяет выделить несколько участков кривых. В диапазоне температур T_{ov} до 130-150 °С происходит разогрев элементов конструкции печи и значительное «отставание» температуры образца T_{sp} от температуры нагревательного элемен-

та печи. При температурах 150-500 °С происходит уменьшение разницы и выравнивание температур образца и печи. На участке 500-800 °С наблюдается наименьшее различие температур печи и образца, не превышающее 6-8 °С. Однако при температурах более 800 °С наблюдается увеличение указанной разницы, что свидетельствует о поглощении тепла в объеме образцов известняка. Это сопровождается снижением ААЭ.

Аналогичные зависимости изменения температуры образца наблюдаются и для известняков нумуллитового известняка, представленных на рис. 3. Отличие от образцов Тигинского месторождения наблюдается для графиков ААЭ, для которой максимум фиксируется при температурах около 480 °С. Второй, но меньший по амплитуде, максимум, отмечен при температуре около 850 °С. При температуре около 900 °С здесь также проявляет себя минимум ААЭ. Отличие зависимостей ААЭ от температуры печи для образцов пород различных месторождений может служить качественным отличительным признаком.

Для количественной оценки, которая может быть использована при автоматизированном распознавании источника происхождения горной породы, должна быть применена соответствующая методика, один из вариантов которой рассмотрен далее.

2. Методика и результаты распознавания места происхождения образцов известняка

Выборки, содержащие данные об всей кривой ТАЭ каждого образца, являются весьма объемными, и значительная часть в них характеризует хаотическую составляющую, обусловленную случайным характером АЭ. В связи с этим необходимо осуществить сглаживающие процедуры, позво-

ляющие сократить объем данных и оставить только те значения, которые характеризуют индивидуальные особенности каждого образца, обусловленные местом его извлечения. При этом каждый образец должен характеризоваться ограниченным набором информативных параметров, рассчитываемым по экспериментальным кривым, описанным выше. Количество таких параметров определяется двумя противоречивыми требованиями. С одной стороны, оно должно быть не очень большим, чтобы не загромождать базу данных. С другой стороны их количество должно давать возможность детального описания каждого образца, не сглаживающего особенности источника его происхождения. Такие информативные параметры могут быть рассчитаны по-разному. В рамках настоящей работы для их расчета весь диапазон температур разбивался на участки заданного размера, в которых производилось усреднение значений акустоэмиссионного параметра (в данном случае это ААЭ). При таком подходе выполнялись оба вышеприведенных требования: осуществлялось сокращение объема исходных данных и усреднение, позволяющие уменьшить долю случайной составляющей, не несущей необходимую информацию.

В нашем случае диапазон температур от 0 °С до 1000 °С разбит на 20 участков по 50 °С. Такая ширина каждого участка соответствует диапазон температур, в которых наблюдаются характерные отличия исследуемых зависимостей. Так, например, участок нарастания среднего значения ААЭ на рис. 3, б, кривая 2, занимает промежуток от 400 до 470 °С. Т. е. полосу шириной в 50 °С находится в пределах этого промежутка, и эта особенность кривой не будет сглажена при расчетах и учтена в дальней-

шем анализе. Среднее значение ААЭ в j -той температурной полосе рассчитывается по формуле

$$\bar{A}_j = \frac{1}{n_j - n_{j+1}} \sum_{i=n_j}^{n_{j+1}} A_i,$$

где \bar{A}_j , A_i - среднее и текущее значения ААЭ в j -й полосе; n_j , n_{j+1} - номера начального и конечного значений ААЭ j -й полосы в общей выборке. Таким образом, для характеристики каждого образца получаем 20 информативных параметров вместо 6000 отсчетов, регистрируемых в процессе лабораторных испытаний.

Считаем, что после предварительных испытаний имеются выборки (вектора) информативных параметров, характеризующих различные места (месторождения) происхождения образцов пород. Набор таких векторов, относящихся к образцам одного месторождения, образует кластер, центр которого характеризуется вектором усредненных значений

$$B_{j,k} = \frac{1}{m_k} \sum_{i=1}^{m_k} \bar{A}_{j,i},$$

где $B_{j,k}$ - j -й элемент вектора, характеризующего центр кластера; k - номер класса (месторождения); m_k - количество элементов в образцовой выборке, характеризующей центр k -того кластера; i - текущий номер образца в образцовой выборке; $\bar{A}_{j,i}$ - значение информативного параметра, усредненно в j -й полосе для данного класса k .

Принадлежность образца к тому или другому месторождению определяется по минимуму расстояния от точки, описываемой вектором информативных параметров, до центров кластеров, характеризующих то или иное месторождение. Для данного образца

$$R_{i,k} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (\bar{A}_{j,i} - B_{j,k})^2},$$

где $R_{i,k}$ - расстояние от точки, описываемой вектором информативных параметров образца с номером i , до центра кластера с номером k , p - количество полос, на которые разбивается весь диапазон температур, т. е. количество информативных параметров; j - номер полосы, в которой осуществляется усреднение; $\bar{A}_{j,i}$ - усредненное значение j -того элемента вектора измеряемой величины (в данном случае ААЭ), характеризующего i -тый образец.

После расчета величины $R_{i,k}$ выбирается номер класса k , для которого она минимальна, и образец относится к этому классу, в нашем случае - к месторождению.

Важнейшей характеристикой распознавания класса, лежащего в основе идентификации, является его достоверность, оцениваемая вероятностью правильного распознавания. Как правило, она оценивается в два этапа.

На первом этапе, когда объем экспериментов невелик, для формирования образцовых и распознаваемых данных берутся одни и те же выборки. По мере накопления опытных данных на втором этапе в качестве образцовых величин берутся одни выборки, а в качестве распознаваемых - другие.

Объем опытных данных, имеющийся на настоящем этапе исследований, позволил оценить вероятность ошибки распознавания по первому варианту. Значения параметра R при сопоставлении образца данному месторождению находятся в диапазоне от 4,4 до 32 единиц, а при отрицании этого - от 18 до 67 единиц, т. е. в по-

следнем случае параметр R имеет значительно большие величины. При этом из 10 образцов известняка Тигинского месторождения и 10 нумулитового один ошибочно отнесен к другой группе, остальные были распознаны правильно. Таким образом, вероятность правильного распознавания месторождения, из которого были извлечены образцы известняков указанных групп, составляет 95%, а вероятность ошибки 5%, что на данном этапе исследований может быть признано удовлетворительным.

Выводы

Термоакустоэмиссионные исследования образцов известняка позволяют расклассифицировать их по принад-

лежности к тому или иному месторождению. Причем, учитывая существенную неоднородность структуры и свойств любых горных пород даже в пределах одного месторождения, соответствующая задаче классификации может быть решена только на вероятностном уровне. Однако, как следует из представленных в работе данных, достижимый уровень правильного распознавания месторождения, из которого был извлечен образец, является вполне приемлемым даже для такого существенно неоднородного геоматериала как известняк и относительно ограниченного объема соответствующих выборок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкуратник В.Л., Кучурин С.В., Винников В.А. Закономерности акустической эмиссии и термоэмиссионного эффекта памяти в образцах угля при различных режимах термического воздействия // ФТПРПИ, 2007, № 4, с. 61-70.

2. Вознесенский А.С., Набатов В.В., Вильямов С.В. Характерные отличия акустической эмиссии гипсосодержащих пород на различных стадиях нагревания // Сбор-

ник трудов XX сессия Российского акустического общества, Т. 1. – М.: ГЕОС, 2008, с. 290-294.

3. Установка для акустоэмиссионных исследований горных пород при их нагревании / Вознесенский А. С., Шкуратник В. Л., Вильямов С. В., Винников В. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2007, №12, с. 143 - 150. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Шкуратник В.Л. – профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой,
E-mail: ftkp@mail.ru

Вознесенский А.С. – профессор, доктор технических наук, E-mail: al48@mail.ru

Набатов В.В. – кандидат технических наук, доцент, E-mail: ftkp@mail.ru

Вильямов С.В. – аспирант, E-mail: serjo@mail.ru

кафедра «Физико-технический контроль процессов горного производства»,
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

