

УДК 534-16; 551.311.8; 551.217

## АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ТЕРМАЛЬНОГО МЕТАМОРФИЗМА

© 2021 г. Н.А. Егоров<sup>1</sup>, М.А. Краснова<sup>1,2</sup>, Д.Е. Белобородов<sup>1</sup>,  
Н.А. Афиногенова<sup>3</sup>, М.А. Матвеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup> Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок, Россия

Автор для переписки: Н.А. Егоров (e-mail: [nikolay.egorov@ifz.ru](mailto:nikolay.egorov@ifz.ru))

Представлены результаты ультразвукового исследования образцов глинистых пород брекчиевидной структуры при поэтапном нагреве до температур 800 и 1100 °С. Эксперименты проводились в целях изучения изменения скоростей и затухания упругих волн при минеральных и структурных преобразованиях в породе в процессе термального метаморфизма. Объектами рассмотрения являлись образцы сопочной брекчии группы грязевых вулканов. В ходе эксперимента определялась скорость продольной волны в образцах после прогрева. Изменения минерального состава контролировались с помощью рентгенодифракционного анализа; для контроля структурных изменений проводилось изучение шлифов на разных этапах прогрева. Методом спектральных отношений исследовалось затухание продольной волны. Анализ зависимостей скорости продольной волны от температуры прогрева для разных грязевых вулканов позволил группировать вулканы предположительно по глубинности питающих очагов. При этом оценка изменений затухания и минерального состава не противоречит выводам, сделанным на основе анализа скоростей. При проведении описываемых экспериментов, разработан новый методический подход, позволяющий изучать образцы слабо консолидированных горных пород в лабораторных условиях на частотах ультразвукового диапазона.

**Ключевые слова:** термальный метаморфизм, сопочная брекчия, слабо консолидированные осадки, ультразвуковые исследования горных пород, затухание упругих волн, добротность, водонасыщенность.

### Введение

Нормальные условия метаморфических преобразований горных пород предполагают воздействие высоких температур и давления. Температура является одним из ведущих факторов метаморфизма. Однако существуют условия, при которых метаморфическое преобразование пород происходит при атмосферном давлении под действием высоких температур, часто этот процесс развивается при контактовом метаморфизме. В результате локального существенного термического воздействия образуется группа пород – контактовых роговиков. Такой тип преобразований пород называется термальным метаморфизмом, изменения горных пород при котором весьма слабо изучены, поскольку в естественных условиях это практически неосуществимо.

В данной статье рассмотрен новый подход к петрофизическому изучению пластичных осадков, основанный на контроле скоростей объемных упругих волн и их затухания в процессе изменения внутренней структуры. Проведены полномасштабные исследования сопочной брекчии ряда грязевых вулканов Керченско-Таманской грязевулканической области. Грязевой вулканизм – современный геологический процесс, распространенный главным образом в зоне Средиземноморского складчатого пояса. Сопочная брекчия, наряду с активной дегазацией, является основным продуктом

грязевого вулканизма. Отложения сопочной брекчии по площади велики и занимают большую часть Керченского и Таманского полуостровов. Современные грязевые вулканы образуют обширные поля излившейся сопочной брекчии, общий объем которой по некоторым подсчетам достигает 40 млрд м<sup>3</sup> [Шнюков и др., 2005]. Изучение петрофизических свойств этой уникальной породы не проводилось, в первую очередь, в связи с сильной литологической изменчивостью и слабым литогенезом. Одной из важных особенностей, повлиявшей на выбор сопочной брекчии для отработки технологий исследования пластичных пород и осадков, изложенных в этой статье, явилось ее литологическая разнородность.

При развитии грязевого вулканизма фиксируется явление, приводящее к образованию специфических термически измененных метаморфических горных пород. Преобразование сопочной брекчии вследствие взрывных извержений (излияний) грязевых вулканов, сопровождающихся самовозгоранием и интенсивным горением газовых составляющих, в основном метанового состава, иногда в течение длительного времени, (“горячих извержений”) принято относить современными учеными к процессу термального метаморфизма [Шнюков, Алиев, 2018] или – “сверхвысокотемпературного низкобарического метаморфизма” [Новиков, 2011]. Некоторые зарубежные исследователи грязевого вулканизма [Mazzini, Etioppe, 2017] называют обработку сопочной брекчии горящим метаном на месте излияний грязевых вулканов “спеканием” (*sintering*). Авторы представленной статьи вслед за Е.Ф. Шнюковым предлагают считать явление преобразования осадков и горных пород под воздействиями высоких температур в приповерхностной зоне в относительно короткое время (от нескольких часов до нескольких дней) частным случаем термального метаморфизма.

Изучение контактовых роговиков позволяет исследовать результаты термального метаморфизма, однако, выяснить его динамические и эволюционные условия крайне сложно. Другой вариант – наблюдать в зонах развития грязевого вулканизма взрывные самовозгорающиеся выбросы метана и грязевулканической смеси. Но случаи горячих извержений грязевых вулканов носят спорадический характер и трудно предсказуемы. Зная условия процесса термального метаморфизма и имея горную породу – сопочную брекчию разных стадий нагрева-спекания (рис. 1), можно исследовать процесс изменения грязевулканического осадка от полужидкой фазы до состояния метаморфической породы.



**Рис. 1.** Различные стадии термообработки сопочной брекчии (по [Шнюков и др., 2005] с изменениями): I – исходная, частично дегидратированная сопочная брекчия; II – кирпично-красная сопочная брекчия, температура воздействия 900–950 °С; III – черная, шлаковидная сопочная брекчия, образованная при температуре свыше 1050 °С

**Fig. 1.** Various stages of heat treatment of the mud breccia (according to [Shnyukov et al., 2005] with changes): I – initial, partially dehydrated mud breccia; II – brick-red breccia, exposure temperature is 900–950 °С; III – black, slag-like mud breccia formed at the temperature above 1050 °С

Исследования скорости упругих волн ультразвукового диапазона при нагреве образцов могут дать некоторые сведения, позволяющие выявить влияние изменения структуры на распространение механических деформаций в глинистой породе. При нагреве глинистые породы дегидратируются – сначала теряют свободную воду, затем химически связанную воду глинистых минералов. При более высоких температурах плотность породы увеличивается за счет перекристаллизации вещества.

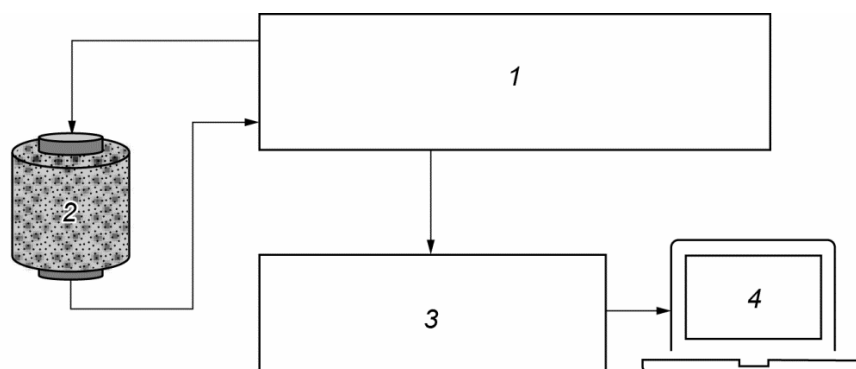
### Методика и техника ультразвуковых исследований

В представленной работе применялся метод ультразвукового прозвучивания, позволяющий определять скорости продольных ( $V_P$ ) и поперечных ( $V_S$ ) волн, прошедших через образец горной породы или донных осадков.

Изучение акустических характеристик сопочной брекчии проводилось на оборудовании, состоящем из:

- генератора-приемника ультразвуковых сигналов “*Olympus 5072 PR*”;
- пар контактовых прямых преобразователей продольной и поперечной волны “*Panametrics*”;
- осциллографа “*TiePie508*”.

Каждый преобразователь использовался и как источник, и как регистратор упругих колебаний. Блок-схема системы наблюдений приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Блок-схема установки для измерения скоростей упругих волн в образцах горной породы  
1 – генератор-приемник ультразвукового сигнала; 2 – образец горной породы; 3 – цифровой осциллограф; 4 – управляющий компьютер

**Fig. 2.** Block diagram of a unit measuring the velocities of elastic waves in rock samples

1 – generator-receiver of ultrasonic signal; 2 – rock sample; 3 – digital oscilloscope; 4 – control computer

С помощью ультразвуковых преобразователей электрическая энергия трансформировалась в механическую (ультразвуковые колебания) и наоборот. Преобразователи  $P$ -волн генерировали или регистрировали смещения, перпендикулярные поверхности преобразователя; преобразователи  $S$ -волн – линейно поляризованные смещения вдоль поверхности преобразователя. Сигнал с преобразователя-регистратора подавался на вход приемного усилителя и перенаправлялся на вход цифрового осциллографа, с помощью которого полученные волновые формы трансформировались в цифровую форму и сохранялись в файлах на жестком диске управляющего компьютера. Начало регистрации волновой формы было синхронизовано с началом импульсного сигнала, подаваемого на активный элемент излучателя.

Зондирование проводилось вдоль оси цилиндрического образца продольными и поперечными волнами, времена пробега которых определялись по первому вступлению на записи сигнала. Скорости объемных волн вычислялись по следующей формуле:

$$V_{P,S} = \frac{l}{t_{P,S} - t_{3(P,S)}}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина образца вдоль оси;  $t_{P,S}$  – времена вступлений продольной или поперечной волны;  $t_{3(P,S)}$  – время реакции измерительной системы, которое определяется как время вступления сигнала при непосредственном контакте преобразователь-источник–преобразователь-приемник. Длина образца  $l$  изменяется в процессе нагрева и это учитывалось при расчете скорости упругих волн. Перед каждой серией экспериментов проводились контрольные измерения времени распространения волны в системе преобразователь–преобразователь, для контроля временной поправки  $t_3$ . Истинное время пробега упругой волны равно разности времени вступления и времени реакции системы  $t_3$  для преобразователей  $P$ - и  $S$ -волн соответственно.

Из-за неравномерной интенсивности ультразвукового поля вблизи источника рекомендуемая длина образца для ультразвуковых исследований должна быть не меньше, чем размер ближней зоны. Размер ближней зоны оценивался по формуле:

$$N_{P,S} = \frac{D^2 f}{4V_{P,S}}, \quad (2)$$

в которой  $D$  – диаметр пьезоэлемента;  $f$  – резонансная частота пьезопреобразователей (табл. 1).

**Таблица 1.** Параметры системы ультразвукового зондирования

Параметр	Значение
Резонансная частота пьезопреобразователей $f$ , Гц	$10^6$
Диаметр пьезоэлемента $D$ , м	$12.7 \cdot 10^{-6}$
Частота оцифровки сигналов $F$ , Гц	$5 \cdot 10^6$

Поскольку в слабо консолидированной водонасыщенной сопочной брекчии наблюдается сильное затухание упругой волны, то для изучения выбирались образцы наименьшей длины.

Согласно формуле (2) и параметрам системы ультразвукового зондирования (см. табл. 1) была подобрана оптимальная для ультразвукового исследования длина образца насыщенной водой глинистой породы – 25 мм. Используемая система наблюдений позволяла определять скорости объемных волн в образцах с точностью  $\pm 20$  м/с.

Кроме скоростных характеристик анализировалось также затухание объемных волн методом спектральных отношений. Амплитудный спектр ультразвуковой волны, прошедший через образец длиной  $l$ , может быть представлен выражением вида [Царанкин и др., 2013]

$$A(f, l) = A_0(f)G(l) \exp(-\alpha(f)l) = A_0(f)G(l) \exp\left(-\frac{\pi f l}{Q(f)V(f)}\right). \quad (3)$$

Здесь  $A_0(f)$  – амплитудный спектр исходного сигнала;  $\alpha(f)$  – коэффициент поглощения;  $Q$  – добротность;  $V$  – скорость упругой волны; множитель  $G(l)$  описывает все частотно-независимые изменения спектра (например, влияние геометрического расхождения). В качестве амплитудного спектра исходного сигнала принимался спектр сигнала системы преобразователь–преобразователь.

Если теперь предположить, что добротность и фазовая скорость слабо зависят от частоты, то логарифм отношения амплитудных спектров сигналов системы преобразователь–преобразователь в образце горной породы может быть аппроксимирован прямой с параметрами  $b(l)$  и  $k(l)$

$$R(f, l) = \frac{\ln A(f, l)}{A_0(f)} = \ln G(l) - \frac{\pi l}{QV} f = b(l) + k(l)f, \quad (4)$$

откуда можно определить добротность

$$Q(l) = -\frac{\pi l}{kV} = -\frac{\pi t}{k}, \quad (5)$$

где  $t$  – время пробега ультразвуковой волны в образце длиной  $l$ .

### Экспериментальный материал

Для изучения была отобрана коллекция образцов сопочной брекчии с разных грязевых вулканов Керченско-Таманской грязевулканической области. Схема проведения исследований приведена на рис. 3.



Рис. 3. Схема проведения исследований

**Fig. 3.** Research scheme: 1 – problem statement – study of petrophysical properties of plastic sediments; 2 – determination of sampling intervals, sampling; 3 – choice of sample preparation technology depending on the water saturation of the sample; 4 – water-saturated samples; 5 – dry samples; 6 – abrasion to a fraction of  $\leq 1$  mm, drying at the temperature of  $70^\circ\text{C}$ , mixing with distilled water to a saturated state; 7 – water saturated rock is packed into plastic cylinders to form samples; 8 – drying at the temperature of  $100^\circ\text{C}$ , cooling, removing from the cylinders; 9 – measurement of physical parameters of samples (mass, diameter, height); 10 – measurement of travel times, calculating the velocities of elastic waves; 11 – heating at a designated step; 12 – analysis of the obtained data; 13 – completion of the research

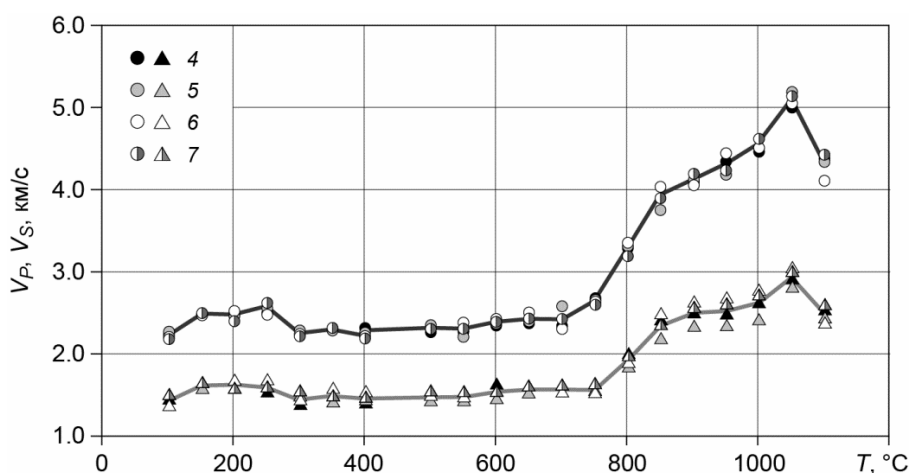
Образцы исследуемой породы подготавливались для измерений в форме цилиндров по двум разным технологиям. В первом случае сохранялся фракционный состав породы (стандартная проба), во втором – дегидратированная порода измельчалась в

однородную по размерам частиц структуру (измельченная проба) и затем снова насыщалась флюидом – дистиллированной водой. Тем самым исключалось влияние неоднородности размеров частиц на акустические характеристики. В процессе ультразвукового исследования образцы подвергались поэтапному прогреву в муфельной печи до температуры 1100 °С, с шагом 50 °С. После каждого этапа прогрева измерялась длина образца, необходимая для расчетов скоростей продольных и поперечных волн, масса с точностью до 0.1 г, проводилось ультразвуковое зондирование. После прогрева до 400, 650, 1000 и 1100 °С порошковые препараты материала образцов анализировались при помощи рентгеновского дифрактометра *STOE* в геометрии “на просвет”. Диагностика минерального состава осуществлялась методом сопоставления экспериментального и эталонных спектров из базы данных *PDF-2* в программном пакете *WinXPow* и базы данных *COD* в программном пакете *QualX*.

### Экспериментальные результаты

Изучались унифицированные пробы, отобранные из семнадцати грязевых вулканов. Из проб с каждого из вулканов было изготовлено по несколько образцов для оценки расхождения результатов. Как отмечено выше, согласно методике эксперимента пробы были разделены на две группы – с сохранением фракционного состава породы и с приведением размеров частиц образца горной породы методом истирания до однородного состояния (см. схему на рис. 3).

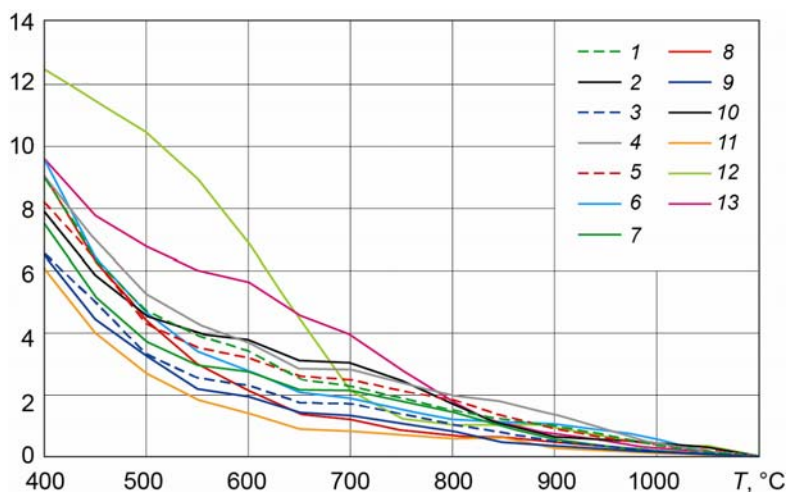
Особое внимание уделялось определению зависимости скорости распространения продольной упругой волны от температуры прогрева образца в целях выявления особенностей термального метаморфизма в акустических характеристиках. Выделение вступлений поперечных волн в образцах сопочной брекчии затруднено, тем не менее на нескольких образцах удалось определить значения  $V_S$ . Анализ скоростей на этих образцах показал, что скорости поперечной волны изменяются после прогрева аналогично скоростям продольной волны (рис. 4).



**Рис. 4.** Вулкан Ахтанизовский. График изменения скоростей продольных (кружки) и поперечных (треугольники) волн в результате поэтапного прогрева образцов 4–7 сопочной брекчии. Каждая точка соответствует значению скорости для одного образца, участвующего в исследованиях

**Fig. 4.** Akhtanizovsky volcano. Plot of changes in the velocities of longitudinal (circles) and transverse (triangles) waves as a result of stage-by-stage heating of samples 4–7 of the mud breccia. Each point corresponds to the velocity value for one sample participating in the research

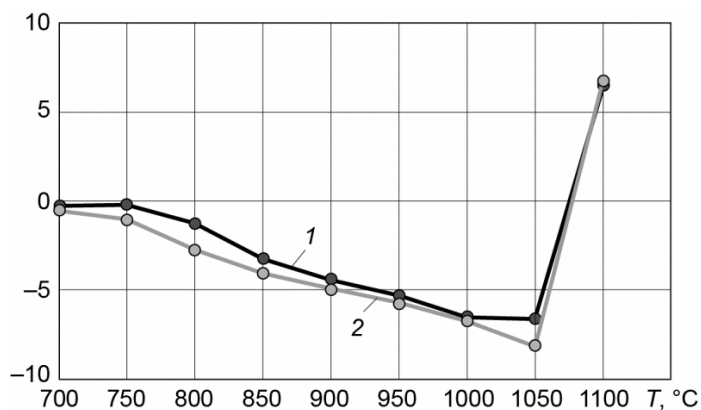
На первых этапах прогрева прослеживается стремительная потеря массы у всех исследуемых образцов. В диапазоне температур от 100 до 400 °С теряется до 24 % массы образца. При значениях температуры, превышающих 400 °С, начинает активно удаляться химически связанная вода, что наблюдается при взвешивании всех исследуемых образцов (рис. 5).



**Рис. 5.** Потеря химически связанной воды образцов сопочной брекчии в результате поэтапного прогрева. На вертикальной оси – содержание химически связанной воды, %. 1–13 – грязевые вулканы: Еникальский (1), Сююрташский (2), Булганакский (3), Ахтанизовский (4), Карabetова Гора (5, новое сопочное поле), Карabetова Гора (6, старое сопочное поле), Новоселовский (7), Чонгелекский (8), Гладковский (9), Шуго (10), Гнилая (11), Семигорский (12), Разнокольский (13)

**Fig. 5.** Loss of the chemically bound water in samples of mud breccia as a result of stage-by-stage heating. On the vertical axis is the content of chemically bound water, %. 1–13 – mud volcanoes: Yenikalsky (1), Syuyurtashsky (2), Bulganaksky (3), Akhtanizovsky (4), Mount Karabetova (5, new mud field), Mount Karabetova (6, old mud field), Novoselovsky (7), Chongeleksky (8), Gladkovsky (9), Shugo (10), Gnilaya (11), Semigorsky (12), Raznokolsky (13)

На интервале температур 700–1050 °С происходит значительная усадка образцов по длине, причем в пробах измельченного вещества этот процесс протекает быстрее, чем в стандартных пробах (рис. 6). При температурах выше 1050 °С на многих образцах наблюдается увеличение объема, так называемое “вспучивание”.

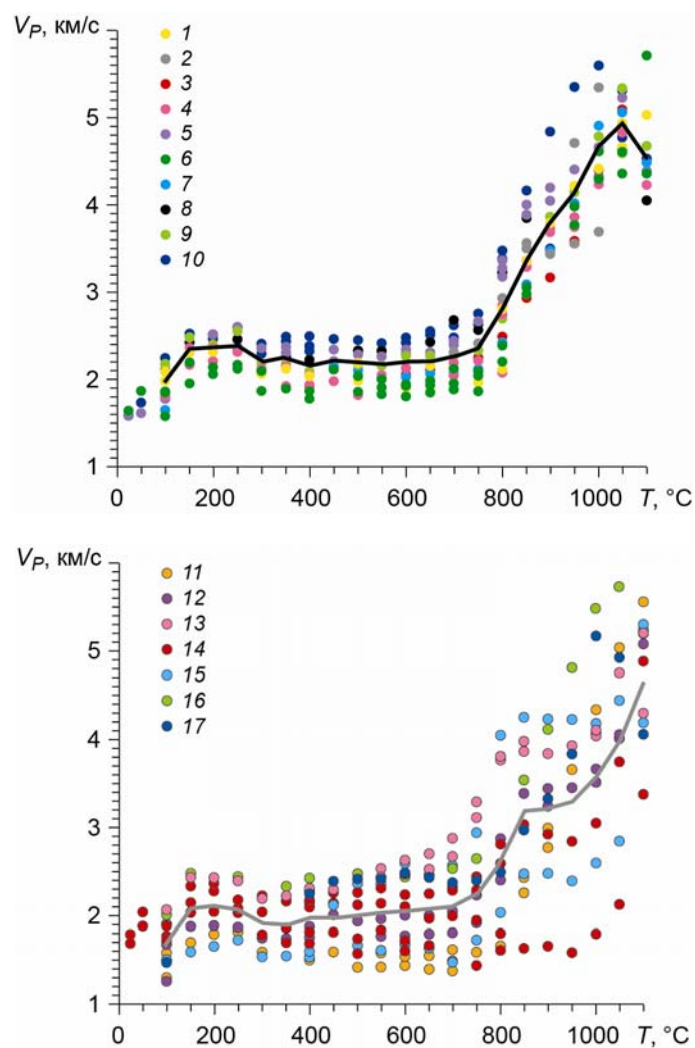


**Рис. 6.** Изменение длины образцов сопочной брекчии в результате поэтапного прогрева. На вертикальной оси – удлинение образца, %; 1 – стандартная проба, 2 – измельченная проба

**Fig. 6.** Change in the length of the samples of the mud breccia as a result of stage-by-stage heating. On the vertical axis is the elongation of the sample, %; 1 – standard sample, 2 – milled sample



В диапазоне температур 100–300 °С скорость продольной волны незначительно возрастает после каждого этапа прогрева. После прогрева до 350 °С значение  $V_p$  немного падает и затем несущественно уменьшается на интервале температур прогрева от 400 до 750 °С. Резкое увеличение скорости (приблизительно в 1.5 раза) для продольной и поперечной волн наблюдается в интервале температур от 700–750 до 1100 °С (рис. 7, *вверху*) и от 700 до 800 °С (рис. 7, *внизу*).



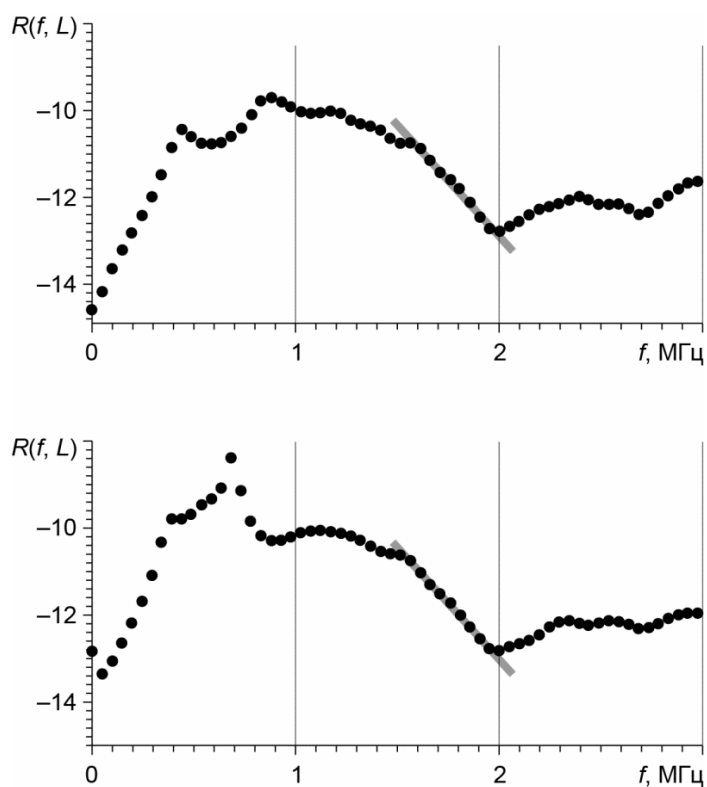
**Рис. 7.** Зависимости скорости продольных волн от температуры прогрева для западной (*вверху*) и восточной (*внизу*) групп грязевых вулканов. 1–17 – грязевые вулканы: Джау-Тепе (1), Еникальский (2), Сююрташский (3), Булганакский (4), Ахтанизовский (5), Карabetова Гора (6), Новоселовский (7), Чонгелекский (8), Пекло Азовское (9), Цымбалы Западные (10), Гладковский (11), Шуго (12), Бугазский (13), Гнилая (14), Семигорский (15), Белый Хутор (16), Разнокольский (17). Сплошные линии – средние значения  $V_p$  для каждой группы

**Fig. 7.** Dependences of the velocity of longitudinal waves on the heating temperature for the western (*above*) and eastern (*below*) groups of mud volcanoes. 1–17 – mud volcanoes: Dzhau-Tepe (1), Yenikalsky (2), Syuyurtashsky (3), Bulganaksky (4), Akhtanizovsky (5), Mount Karabetova (6), Novoselovsky (7), Chongeleksky (8), Peklo Azovskoye (9), Tsymbaly Zapadnye (10), Gladkovsky (11), Shugo (12), Bugazsky (13), Gnilaya (14), Semigorsky (15), Bely Khutor (16), Raznokolsky (17). Solid lines – average  $V_p$  values for each group



Для каждого грязевого вулкана исследовалось по несколько образцов, которые показали схожие результаты. Поведение скоростей продольной волны в образцах сопочной брекчии от температуры прогрева отличаются для разных грязевых вулканов. По зависимости изменения  $V_P$  от температуры прогрева грязевые вулканы можно разделить на две группы. В первой (западной) группе при температурах прогрева от 800 до 1050 °С скорость растет практически линейно (см. рис. 7, *вверху*). При внимательном изучении скоростей для образцов второй (восточной) группы в интервале температур 800–950 °С видно, что практически для всех вулканов этой группы кривые скоростей выполаживаются, что отражается и на средних значениях скоростей, при этом значения скорости для разных вулканов различаются достаточно сильно. При более высоких температурах прогрева рост скоростей возобновляется (см. рис. 7, *внизу*).

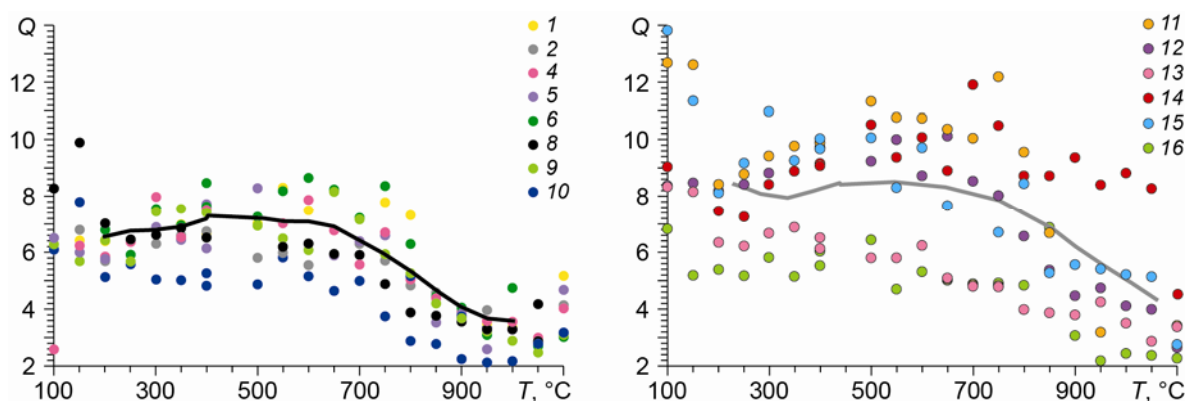
Для исследования поглощения в образцах методом спектральных отношений рассматривался сигнал в окне длительностью порядка двух периодов с момента вступления волны. Анализ поглощения проводился в частотном диапазоне 1.5–2.0 МГц, содержащем основную часть энергии сигнала. Примеры спектральных отношений показаны на рис. 8. В качестве эталонного был выбран спектр сигнала в системе датчик–датчик. Добротность вычислялась по формулам (4), (5), параметр  $k$  определялся как угловой коэффициент серой прямой на графиках.



**Рис. 8.** Примеры спектральных отношений для образцов сопочной брекчии с вулканов Булганакский (*вверху*) и Гладковский (*внизу*). Серая линия – прямая, аппроксимирующая линейный участок спектрального отношения

**Fig. 8.** Examples of spectral ratios for samples of mud breccia from the Bulganaksky (*above*) and Gladkovsky (*below*) volcanoes. The gray line is a straight line approximating the linear portion of the spectral ratio

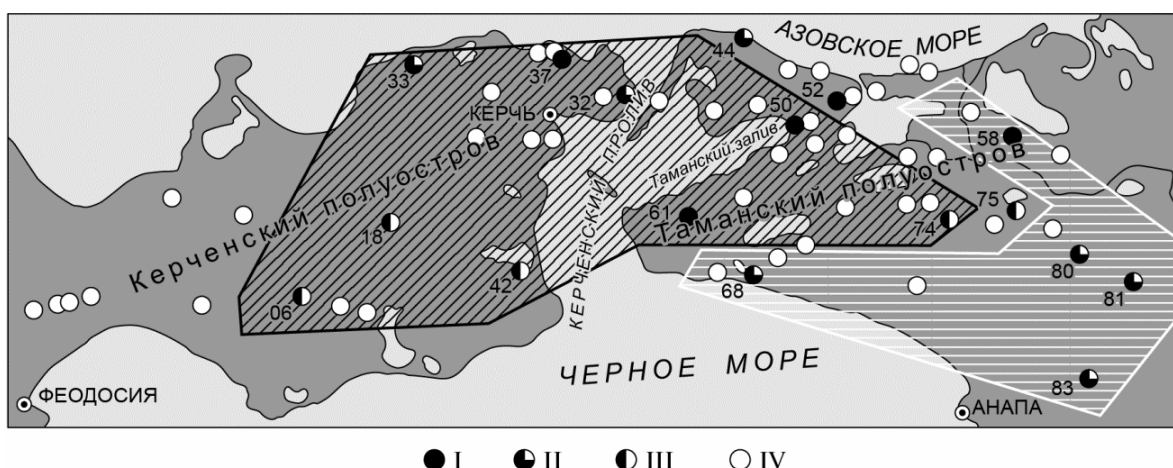
Зависимости добротности исследованных образцов от температуры прогрева приводятся на рис. 9, где разделение грязевых вулканов на группы соответствует распределению на рис. 7. Анализ зависимостей скоростей продольной волны и добротностей в каждой из групп показывает, что результаты в западной группе достаточно однородны и позволяют предположить, что грязевые вулканы этой группы имеют глубинный очаг, расположенный на едином литостратиграфическом уровне. Разнородные результаты по вулканам восточной группы могут означать, что эти вулканы питаются мелкими очагами, расположенными на разных глубинах.



**Рис. 9.** Зависимость добротности образцов от максимальной температуры прогрева для западной (слева) и восточной (справа) групп грязевых вулканов. Сплошные линии – средние значения  $Q$  для каждой группы. Условные обозначения см. на рис. 7

**Fig. 9.** Dependence of the quality factor of samples on the maximum heating temperature for the western (left) and eastern (right) groups of mud volcanoes. Solid lines – average  $Q$  values for each group. See notations in Fig. 7

Географическое положение выделенных групп вулканов показано на рис. 10.



**Рис. 10.** Географическое положение выделенных групп грязевых вулканов, черная штриховка – западная группа, белая – восточная. Грязевые вулканы, образцы которых исследовались: I – на всех этапах (2017–2019 гг.); II – 2018–2019 гг.; III – только в 2019 г.; IV – не участвовали в исследовании; цифрами обозначены номера грязевых вулканов, изученных в [Шнюков и др., 2005]: 06 – Джау-Тепе, 18 – Новоселовский, 32 – Еникальский, 33 – Сююрташский, 37 – Булганакский, 42 – Чонгелекский, 44 – Пекло Азовское, 50 – Цымбалы Западные, 52 – Ахтанизовский, 58 – Гнилая, 61 – Карабетова Гора, 68 – Бугазский, 74 – Белый Хутор, 75 – Разнокольский, 80 – Шуго, 81 – Гладковский, 83 – Семигорский

**Fig. 10.** Geographical position of the identified groups of mud volcanoes, black shading – western group, white – eastern. Mud volcanoes which samples were studied: I – at all stages (2017–2019); II – 2018–2019; III – only in 2019; IV – did not participate in the study; the numbers indicate the numbers of the mud volcanoes studied in [Shnyukov et al., 2005]: 06 – Dzshau-Tepe, 18 – Novoselovsky, 32 – Yenikalsky, 33 – Syuyurtashsky, 37 – Bulganaksky, 42 – Chongeleksky, 44 – Peklo Azovskoye, 50 – Tsybaly Zapadnye, 52 – Akhtanizovsky, 58 – Gnilaya, 61 – Mount Karabetova, 68 – Bugazsky, 74 – Bely Khutor, 75 – Raznokolsky, 80 – Shugo, 81 – Gladkovsky, 83 – Semigorsky

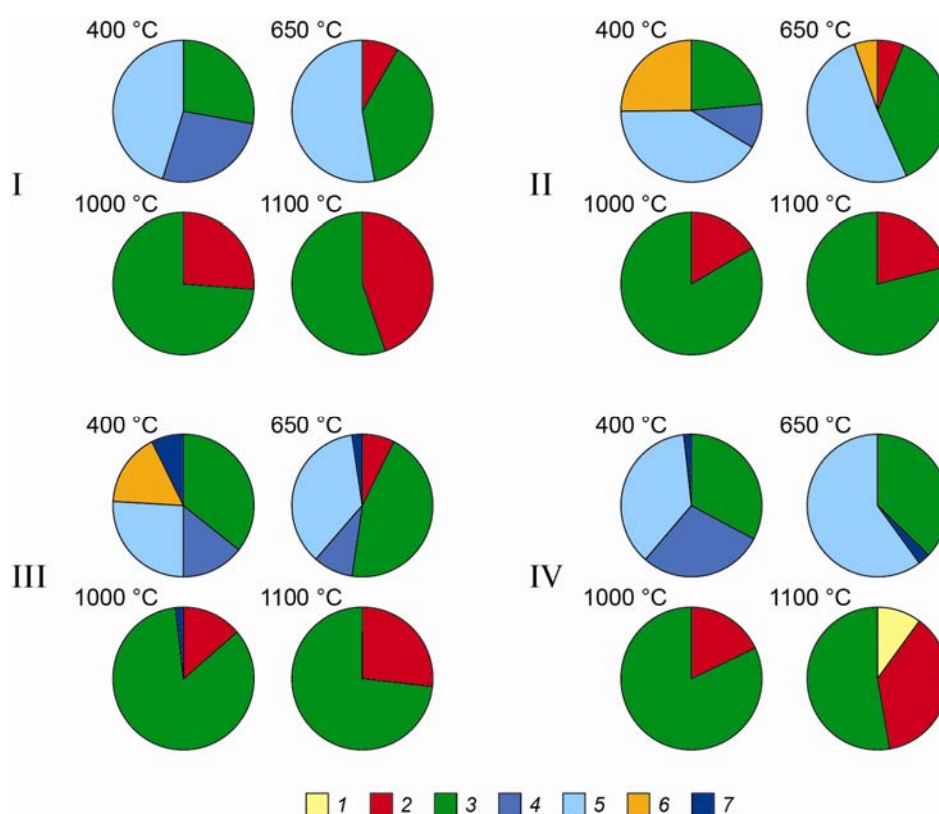
Кроме ультразвукового исследования для выявления последовательности минеральных преобразований, происходящих при нагреве сопочной брекчии, проводилось рентгенодифракционное исследование образцов сопочной брекчии, прогретых до 400, 650, 1000, 1100 °С. Результаты экспериментов сведены в табл. 2 и представлены на рис. 11. Для тех же температур прогрева были изготовлены шлифы для детального изучения минералогического состава сопочной брекчии грязевых вулканов.

**Таблица 2.** Рентгенодифракционный анализ сопочной брекчии после прогрева

Грязевой вулкан	T, °С	Содержание минерала, масс. %								
		Кварц	Муллит	Пирит	Гематит	Плагиоклазы	Глинистые минералы	Слюда	Карбонаты	Прочие
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Гладковский	400	58.4	0	0	0	18.1	15.4	20.3	0	1.0
	650	61.8	0	0	0	14.3	3.2	22.9	0	0
	1000	79.7	0	0	3.7	16.6	0	0	0	0
	1100	70.6	3.1	0	10.8	15.5	0	0	0	0
Бугазский	400	45.3	0	0	0	15.3	0	29.2	10.2	0
	650	49.0	0	0	0	17.8	0	33.2	0	0
	1000	32.7	0	0	15.2	52.1	0	0	0	0
	1100	15.3	0	0	15.6	69.1	0	0	0	0
Семигорский	400	30.7	0	0	0	16.6	3.0	23.6	26.1	0
	650	35.4	0	0	0	22.4	0	22.5	19.7	0
	1000	26.2	0	0	6.7	63.0	0	0	4.1	0
	1100	3.1	0	0	3.5	93.4	0	0	0	0
Карабетова Гора (новое поле)	400	63.4	0	0	0	15.0	10.5	6.9	0	4.2
	650	47.0	0	0	4.5	15.4	5.1	23.7	0	4.3
	1000	55.3	0	0	13.3	26.0	0	0	0	5.4
	1100	62.8	4.1	0	12.1	17.9	0	0	0	3.1
Карабетова Гора (старое поле)	400	50.6	0	0	0	13.5	15.2	20.7	0	0
	650	61.3	0	0	4.7	11.0	0	18.1	0	4.9
	1000	66.9	0	0	10.9	13.6	0	0	0	8.6
	1100	63.1	4.3	0	14.2	13.9	0	0	0	4.5
Разнокольский	400	48.7	0	0	0	0	10.6	23.7	0	17.0
	650	47.5	1.0	0	4.7	0	3.9	21.5	0	21.4
	1000	57.7	8.0	0	12.6	0	0	0	0	21.7
	1100	36.7	32.2	0	31.1	0	0	0	0	0
Ахтанизовский	400	48.7	0	0	0	11.5	4.9	20.3	12.1	2.5
	650	49.6	0	0	2.9	17.6	0	24.4	2.5	3.0
	1000	45.8	0	0	8.1	41.6	0	0	0	4.5
	1100	33.6	0	0	13.2	49.1	0	0	0	4.1
Гнилая	400	49.8	0	0	0	18.0	7.3	12.7	8.4	3.8
	650	60.5	0	0	2.9	17.8	3.5	14.4	0	0.9
	1000	40.9	0	0	8.2	49.8	0	0	0	1.1
	1100	39.9	0	0	16.3	43.8	0	0	0	0
Сююрташский	400	65.4	0	0	0	15.2	0	19.2	0	0
	650	54.8	0	0	2.7	17.4	0	19.6	0	5.5
	1000	46.0	0	0	8.5	42.2	0	0	0	3.3
	1100	51.8	7.4	0	25.2	12.5	0	0	0	3.1

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Булганакский	400	54.6	0	0	0	12.7	12.2	20.5	0	0
	650	63.3	0	0	2.8	13.5	0	18.2	0	2.2
	1000	72.2	0	0	7.3	20.5	0	0	0	0
	1100	62.5	0	0	16.8	20.7	0	0	0	0
Новоселовский	400	49.6	0	0	0	11.2	13.7	22.6	0	2.9
	650	57.4	0	0	2.5	14.7	0	25.4	0	0
	1000	76.7	0	0	10.7	12.6	0	0	0	0
	1100	61.9	12.2	0	18.0	7.9	0	0	0	0
Еникальский	400	50.5	0	0	0	18.4	0	21.1	0	10
	650	56.2	0	0	0	17.1	0	22.4	0	4.3
	1000	46.1	0	0	11.2	41.0	0	0	0	1.7
	1100	28.2	0	0	21.6	50.2	0	0	0	0
Шуго	400	53.8	0	0	0	8.3	2.7	22.9	12.3	0
	650	62.2	0	0	1.5	9.7	0	23.5	3.1	0
	1000	44.6	0	0	8.6	46.8	0	0	0	0
	1100	42.4	0	0	9.6	48.0	0	0	0	0



**Рис. 11.** Изменение минерального состава сопочной брекчии для западной (вверху) и восточной (внизу) групп вулканов. 1 – муллит; 2 – гематит; 3 – плагиоклазы; 4 – глинистые минералы; 5 – слюды; 6 – карбонаты; 7 – прочие минералы. I–IV – грязевые вулканы: Булганакский (I), Ахтанизовский (II), Гнилая (III), Гладковский (IV)

**Fig. 11.** Changes in the mineral composition of the mud breccia for the western (above) and eastern (below) groups of volcanoes. 1 – mullite; 2 – hematite; 3 – plagioclase; 4 – clay minerals; 5 – mica; 6 – carbonates; 7 – other minerals. I–IV – mud volcanoes: Bulganaksky (I), Akhtanizovsky (II), Gnilaya (III), Gladkovsky (IV)

### Обсуждение результатов

Глубинное строение и механизмы деятельности отдельных грязевых вулканов достаточно подробно и многократно изучены и описаны (см., например, [Авдусин, 1948; Рахманов, 1987; Суббота, 1964; Шнюков, Нетребская, 2016; Овсяченко, Собисевич, Сысолин, 2017; Преснов и др., 2020]), поэтому авторами не ставилась задача освещения этого вопроса. Наша задача – изучить физико-минералогическую эволюцию поступающего с помощью эруптивного канала вулкана вещества, подвергнутого обжигу горячей струей метана. Для этого необходимо остановиться на исходном состоянии поступающего вещества.

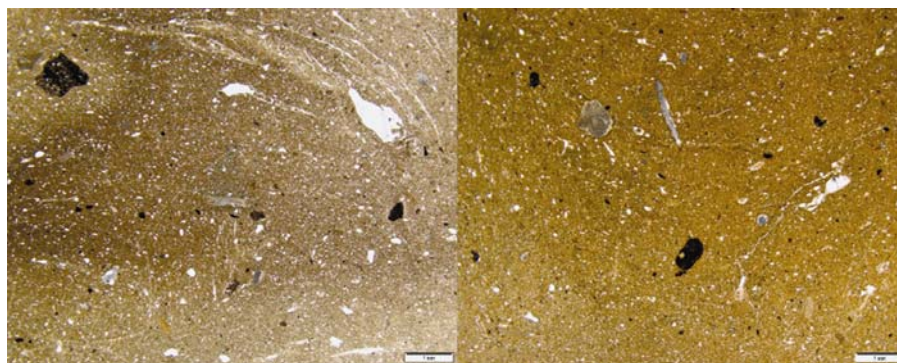
В большинстве действующих грязевых вулканов основной поставляемый продукт – флюидонасыщенная смесь. В состав смеси входит газ (преимущественно метан), вода, сопочная брекчия сложного, многокомпонентного состава в виде грязекаменной пульпы. Минеральный состав сопочной брекчии разнообразен и по различным данным в него входит до 60 минералов [Шнюков и др., 2005; Sokol et al., 2018; Shnyukov, Yanko-Nombach, 2020]. Смесь в процессе доставки на поверхность хорошо перемешана. В условиях спокойного излияния газ полностью выделяется в атмосферу. Свободная вода удаляется лишь частично, активно в первое время. Дегидратация может длиться сколь угодно долго, и постепенно переходить к стадиям диагенеза.

При самовозгорании газовой составляющей, являющейся активным окислителем поступающей смеси, происходит одномоментный процесс перехода вещества из полужидкого и жидкого состояния раствора в твердое состояние литофицированной породы. При этом, свободная, не связанная вода удаляется в течение первого интервала прогрева – до 100–150 °С. Температура горения метана на воздухе достигает 1900 °С, первый температурный порог преодолевается практически мгновенно – в первые минуты. Сопочная брекчия прогревается неравномерно, образуя условно трехкомпонентный агрегат по степени изменения [Казначеев и др., 2019]. Внешняя часть (поверхность и глубины до 0.5 см) образует зону окисления – поверхность обжига, корку спекания. В этой части породы происходит полное удаление свободной воды и существенное удаление химически связанной воды (межслоевая вода в смешаннослойных минералах глин, группы монтмориллонита, иллита, хлорита, вермикулита). В переходной зоне породы происходит потеря только свободной воды, тогда как в центральной зоне потеря воды минимальна и составляет 75–80 %. В центральной части изменения при низкотемпературном нагревании проходят незначительно, лишь частично консолидируя пластичное глинистое вещество.

Далее вещество прогревается до температурного порога около 300 °С. Подвергнутая нагреву сопочная брекчия полностью утрачивает свободную воду. Формируется более тугоплавкая “рубашка” из окисленного вещества, она создает барьер, препятствующий удалению оставшейся (связанной) воды. Этап быстрого прогрева вещества с 15–20 °С до 300 °С можно назвать “эрзац-диагенезом”. Вещество консолидируется, переходит из полужидкого в твердое состояние; образуется первичная порода.

Следующий этап – прогрев в интервале от 350–750 °С. Это наиболее длительный период преобразования вещества. Глинистые минералы на этой стадии теряют химически связанную воду, наблюдается потеря межслоевой воды. За счет изменения межслоевого пространства вещество уплотняется, что выражается в уменьшении объема, происходит “воздушная усадка”. Некоторые легкоплавкие минералы переходят в расплав и запускаются реакции перекристаллизации из расплава (например, гематита и альбита). Вероятно, расплав заполняет поры, в которых ранее были вода и газ. Это отражается на облике исследуемых образцов – появляется стеклянный блеск, типичный

керамический звук при ударе. Также при помощи термоакустического метода регистрируется переход низкотемпературной модификации  $\alpha$ -кварца в высокотемпературную модификацию –  $\beta$ -кварц [Грим, 1956; Казначеев и др., 2019]. За счет активного окисления и увеличения количества гематита и других окислов железа цвет породы меняется с серого, зеленовато-серого на характерный “кирпичный” (рис. 12). Этот этап мы условно соотносим с метагенезом и называем его “эрзац-метагенезом”.



**Рис. 12.** Грязевой вулкан Сююрташский. Фотографии шлифов при температуре прогрева 400 °С (слева) и 650 °С (справа) при одном Николе. Наблюдается изменение цветовой окраски цемента за счет окисления и увеличение гематита

**Fig. 12.** Syuyurtashsky mud volcano. Photos of thin sections at a heating temperature of 400 °C (left) and 650 °C (right) at one nicol. There is a change in the color of the cement due to oxidation and an increase in hematite

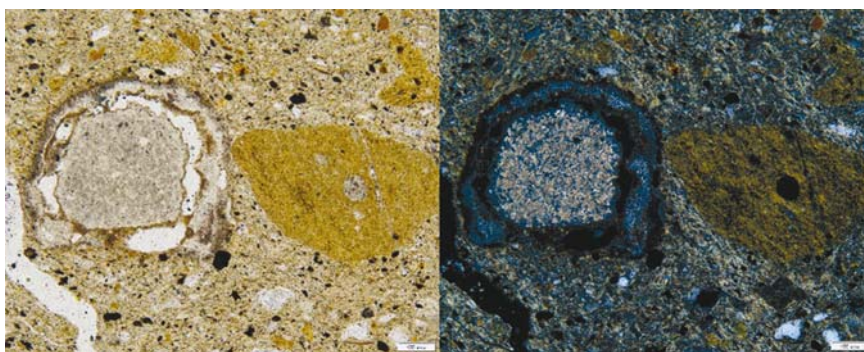
На интервале 750–1100 °С существенно меняется структура и химический состав вещества. Все минералы, кроме тугоплавких, подвергаются расплавлению. Увеличение плотности образцов в диапазоне прогрева 750–1050 °С тесно связано с уменьшением их линейных размеров (см. рис. 6). На данном интервале температур происходит огневая усадка образцов по длине под влиянием физико-химических процессов при обжиге – выгорании органических примесей, дегидратации глинистых минералов, разложении карбонатов, модификационных превращениях кварца, фазовых изменениях состава глинистого вещества [Салахов, Тагиров, 2015]. В этом интервале температур происходит процесс фазовых превращений за счет перехода сульфидов и карбонатов железа (пирит, сидерит) в окислы (гематит), что подтверждается рентгенофазовым анализом для всех образцов. По кайме миндалин карбоната (следы фауны) более интенсивно проявлен процесс диссоциации (разложение  $\text{CaCO}_3$  на  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ ), на что указывает появление тонкой изотропной каемки, тогда как ядро миндалины еще сохраняет интерференционные окраски высшего порядка и “минеральную структуру” (рис. 13).

В процессе дальнейшего обжига в системе  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  образуется геленит и анортит как из оксидов, так и из смесей  $\text{CaO}\times\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}\times\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2+\text{CaCO}_3$  или  $\text{CaO}\times\text{SiO}_2$ , что подтверждается результатами рентгенофазового анализа при температурах 1100 °С в ряде некоторых вулканов (см. табл. 2).

Процесс огневой усадки отражается на увеличении скоростей распространения ультразвуковых колебаний за счет уплотнения вещества.

При температурах от 1050 °С начинается кристаллизация высокотемпературных минералов: муллита, низкотемпературного волластонита и, возможно, некоторых технических минералов (см. табл. 2). При кристаллизации волластонита с выделением углекислого газа объем подверженной нагреву сопочной брекчии увеличивается до 15 %.

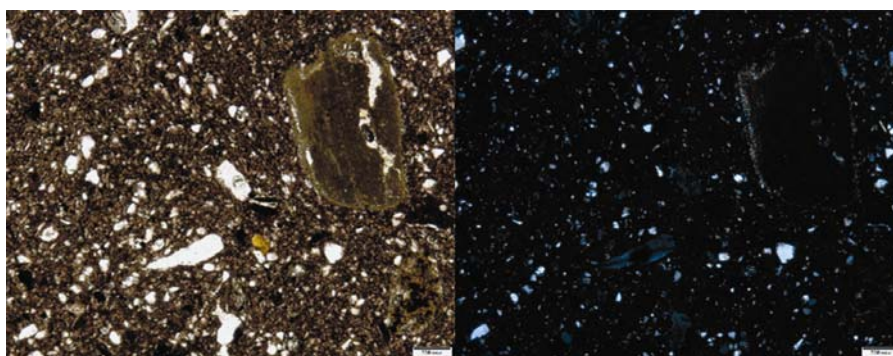




**Рис. 13.** Грязевой вулкан Шуго. Фотографии шлифов при температуре прогрева 650 °С при одном (слева) и двух (справа) Николях. По кайме миндалин карбоната (следы фауны) более интенсивно проявлен процесс диссоциации (разложение  $\text{CaCO}_3$  на  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ ), на что указывает появление тонкой изотропной каемки

**Fig. 13.** Shugo mud volcano. Photos of thin sections at a heating temperature of 650 °С with one (left) and crossed nicols (right). Along the rim of carbonate amygdals (traces of fauna), the process of dissociation (decomposition of  $\text{CaCO}_3$  into  $\text{CaO}$  and  $\text{CO}_2$ ) is more intense, as indicated by the appearance of a thin isotropic rim

На поверхностях появляются следы дегазации. В производстве керамзита эта стадия нагрева глинистого сырья называется “вспучиванием”. Цвет меняется, становится интенсивно коричневым, темно-коричневым. Такое изменение цемента – результат деструктуризации и аморфизации глинистых минералов. Некоторые миндалины практически полностью замещены железистыми минералами (рис. 14). При увеличении температуры цвет меняется на черный, как показывают многочисленные находки [Шнюков и др., 2005]. Мы предлагаем применительно к процессу термального метаморфизма назвать данную стадию “эрзац-катагенезом”.



**Рис. 14.** Грязевой вулкан Карabetова. Фотографии шлифов при температуре прогрева 1000 °С при одном (слева) и двух (справа) Николях. Аморфизация глинистого цемента с характерным темно-коричневым или бордовым оттенком “стекла”. Цемент стал полностью изотропным, что более ярко подчеркивает наличие огромного количества мелких вкрапленников плагиоклаза и кварца. Карбонатные миндалины полностью замещаются железистыми и глинистыми минералами

**Fig. 14.** Karabetova mud volcano. Photos of thin sections at a heating temperature of 1000 °С with one (left) and crossed nicols (right). Amorphization of clay cement with a characteristic dark brown or burgundy “glass” tint. The cement became completely isotropic, which more clearly emphasizes the presence of a huge number of small phenocrysts of plagioclase and quartz. Carbonate amygdals are completely replaced by ferruginous and clay minerals



## Заключение

Проведенные эксперименты продемонстрировали принципиальную возможность лабораторного исследования акустических характеристик пластичных осадков. Процесс термального метаморфизма смоделирован в лабораторных условиях.

Акустические исследования сопочной брекчии позволили получить связанные с термальным метаморфизмом новые данные о преобразовании осадков, не противоречащие существующим представлениям о высокотемпературных изменениях сопочной брекчии в результате импульсных спорадических возгораний при извержениях грязевых вулканов.

В результате применения комплексного подхода получены качественные и количественные данные, раскрывающие процесс изменения глинистого вещества. В ходе ультразвуковых исследований проведены наблюдения за изменением характеристик упругих волн при нагревании. Минеральные ассоциации и фазовые изменения вещества при нагреве изучены с помощью рентгенодифракционного анализа. Описание шлифов позволило визуализировать переходные стадии и изучить литологический и минералогический состав сопочной брекчии грязевых вулканов Керченско-Таманской грязевулканической области.

Представленные результаты существенно расширяют понятия об изменении вещества в процессе термального метаморфизма, способствуют получению более полной картины эволюции глинистых пород.

Установлено, что:

1) изменение глинистого вещества (сопочной брекчии) в процессе термального метаморфизма происходит в несколько стадий – температурных интервалов;

2) каждый интервал изменения скоростей упругих волн связан с физико-химическими изменениями, которые характеризуются уплотнением вещества за счет дегидратации на начальных этапах нагрева, минералогическими и фазовыми преобразованиями при более высоких температурах;

3) для каждого температурного интервала существуют характерные значения скоростей продольных волн;

4) комплексное изучение микроструктуры глинистых пород (рентгенодифракционный анализ и описание шлифов) позволило связать температурные интервалы с изменениями микроструктуры и минерального состава породы и скоростями упругих колебаний;

5) примененный подход предоставил возможность сгруппировать рассмотренные грязевые вулканы Керченско-Таманской грязевулканической области по принадлежности к грязевулканическим очагам.

Дальнейшие экспериментальные исследования в этом направлении могут дать возможность классифицировать породы по акустическим характеристикам и связать акустические характеристики с количественным содержанием в них глинистых и сопутствующих минералов. Для этого необходимо более детальное изучение связей между акустическими параметрами и структурными преобразованиями породы в результате термального метаморфизма. Такие исследования дают понимание физических особенностей процессов, протекающих на небольших глубинах или на поверхности Земли при воздействии высоких температур, таких как огненные извержения грязевых вулканов.

## Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

- Авдусин П.П. Грязевые вулканы Крымско-Кавказской геологической провинции. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 192 с.
- Грим Р.Е. Минералогия глин. М.: Издательство иностранной литературы, 1956. 457 с.
- Казначеев П.А., Белобородов Д.Е., Майбук З.-Ю.Я., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А. О возможности выделения стадий и условий высокотемпературного обжига сопочной брекчии при помощи метода акустической эмиссии // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98, № 2. С.5–24.
- Новиков И.С. Древние грязевулканические формы рельефа Южного Леванта // Геоморфология. 2011. № 2. С.90–102.
- Овсяченко А.Н., Собисевич А.Л., Сысолин А.И. О взаимосвязи современных тектонических процессов и грязевого вулканизма на примере Горы Карабетова (Таманский п-ов) // Физика Земли. 2017. № 4. С.118–129. DOI: 10.7868/S000233371704007X
- Преснов Д.А., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Белобородов Д.Е., Дударов З.И., Долов С.М. Новые данные о глубинном строении грязевого вулкана Джау-Тепе // Вулканология и сейсмология. 2020. № 3. С.34–45.
- Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газонефтеносности недр. М.: Недра, 1987. 174 с.
- Салахов А.М., Тагиров Л.Р. Структурообразование керамики из глин, формирующих при обжиге различные минеральные фазы // Строительные материалы. 2015. № 8. С.68–74.
- Суббота М.И. Новые данные о газах и типах грязевых вулканов района Западной Кубани // Труды ВНИГНИ. 1964. Вып. 41. С.156–178.
- Царапкин М.Е., Дугаров Г.А., Карстен В.В., Горшкалёв С.Б., Определение сейсмической добротности продуктивного интервала по данным ВСП скважины Пеляткинская-830 модифицированным методом спектральных отношений // ГЕО-Сибирь. 2013. Т. 2. С.29–34.
- Шнюков Е.Ф., Алиев Ад. А. Изучение акцессорной минерализации сопочной брекчии грязевых вулканов Азербайджана – одно из направлений познания их генезиса // Известия Академии наук Азербайджана. 2018. № 1. С.11–23.
- Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. О глубинном строении эруптивного канала грязевых вулканов // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2016. № 4. С.54–66.
- Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А., Кутний В.А., Гусаков И.Н., Трофимов В.В. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: ООО “Глав-Медиа”, 2005. 176 с.
- Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review // Earth-Science Reviews. 2017. V. 168. P.81–112.
- Shnyukov E., Yanko-Hombach V. Mud Volcanoes of the Black Sea Region and their Environmental Significance. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 512 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40316-4>
- Sokol E., Kokh S., Kozmenko O., Novikova S., Khvorov P., Nigmatulina E., Belogub E., Kirillov M. Mineralogy and Geochemistry of Mud Volcanic Ejecta: A New Look at Old Issues (A Case Study from the Bulganak Field, Northern Black Sea) // Minerals. 2018. V. 8, N 344. 38 p. DOI: 10.3390/min8080344

### Сведения об авторах

**ЕГОРОВ Николай Александрович** – ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-40. E-mail: nikolay.egorov@ifz.ru

**КРАСНОВА Мария Александровна** – ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва,

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; научный сотрудник, Московский физико-технический институт. 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: +7(499) 254-90-42. E-mail: mkrasnova@ifz.ru

**БЕЛОБОРОДОВ Денис Евгеньевич** – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-40. E-mail: beloborodov@ifz.ru

**АФИНОГЕНОВА Наталья Александровна** – младший научный сотрудник, Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 142. Тел.: +7(485) 472-40-24. E-mail: arhina312@mail.ru

**МАТВЕЕВ Максим Алексеевич** – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-92-05. E-mail: matveevmaksim93@mail.ru

## ACOUSTIC STUDIES OF CLAY ROCKS DURING THERMAL METAMORPHISM

N.A. Egorov<sup>1</sup>, M.A. Krasnova<sup>1,2</sup>, D.E. Beloborodov<sup>1</sup>,  
N.A. Afinogenova<sup>3</sup>, M.A. Matveev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

<sup>3</sup> *Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Borok, Russia*

*Corresponding author: N.A. Egorov (e-mail: nikolay.egorov@ifz.ru)*

**Abstract.** The article discusses the results of ultrasonic testing of samples of clay rocks of a breccia-like structure during stage-by-stage heating to temperatures of 800 and 1100 °C. The experiments were carried out in order to study the change in the velocities and attenuation of elastic waves during mineral and structural transformations in the rock in the course of thermal metamorphism. The objects of study were samples of a mud breccia of a group of mud volcanoes. During the experiment, the velocity of the longitudinal wave in the samples after heating was determined. Changes in mineral composition were monitored using X-ray diffraction analysis; to control structural changes, thin sections were studied at different stages of heating. The attenuation of a longitudinal wave was analyzed by the method of spectral ratios. Analysis of the dependences of the longitudinal wave velocity on the heating temperature for different mud volcanoes made it possible to group volcanoes, presumably according to the depth of the feeding foci. At the same time, the analysis of changes in attenuation and mineral composition does not contradict the conclusions drawn from the analysis of velocities. When carrying out the described experiments, a new methodological approach has been developed, which enables to study samples of weakly consolidated rocks in laboratory conditions at frequencies of ultrasonic range.

**Keywords:** thermal metamorphism, mud breccia, weakly consolidated sediments, ultrasound studies of rocks, attenuation of elastic waves, quality factor, water saturation.

### Funding

The study was carried out within the framework of the State assignment of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

### Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

## References

- Avdusin P.P., *Mud volcanoes of the Crimean-Caucasian geological province*, Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1948.
- Grim R.E., *Mineralogiya glin* (Mineralogy of Clays), Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1956, 452 p. [in Russian].
- Kaznacheev P.A., Beloborodov D.E., Maybuk Z.-Yu.Ya., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Laboratory Possibility for Revealing Stages and Conditions of High-Temperature Firing of Mud Breccia Using Acoustic Emission, *Seismic Instruments*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 399-410.
- Mazzini A., Etiope G., Mud volcanism: An updated review, *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 168, pp. 81-112.
- Novikov I.S., Ancient mud volcanic landforms of the Southern Levant, *Geomorphology*, 2011, no. 2, pp. 90-102.
- Ovsyuchenko A.N., Sobisevich A.L., Sysolin A.I., On the relationship of modern tectonic processes and mud volcanism on the example of Karabetov Mountain (Taman Peninsula), *Physics of the Earth*, 2017, no. 4, pp. 118-129. DOI: 10.7868/S000233371704007X
- Presnov D.A., Zhostkov R.A., Likhodeev D.V., Beloborodov D.E., Dudarov Z.I., Dolov S.M., New data on the deep structure of the mud volcano Dzhau-Tepe, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2020, vol. 14, pp. 166-176.
- Rakhmanov R.R., *Gryazevye vulkany i ikh znachenie v prognozirovanii gazoneftnosnosti nedr* (Mud volcanoes and their importance in predicting the oil and gas content of the subsoil), Moscow: Nedra, 1987, 174 p. [in Russian].
- Salakhov A.M., Tagirov L.R., Structural formation of ceramic with clays, which form various mineral phases at burning, *Stroitel'nye materialy* (Building materials), 2015, no. 8, pp. 68-74. [in Russian].
- Shnyukov E., Yanko-Hombach V., *Mud Volcanoes of the Black Sea Region and their Environmental Significance*, Springer Nature Switzerland AG, 2020, 512 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40316-4>
- Shnyukov E.F., Aliev Ad.A., Study of the accessory mineralization of the mud volcanoes of Azerbaijan mud volcanoes is one of the directions of knowledge of their genesis, *Izvestiya Akademii nauk Azerbaidzhana* (Bulletin of the Academy of Sciences of Azerbaijan), 2018, no. 1, pp. 11-23. [in Russian].
- Shnyukov E.F., Netrobskaya E.Ya., On the deep structure of the eruptive channel of mud volcanoes, *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* (Geology and minerals of the World Ocean), 2016, no. 4, pp. 54-66. [in Russian].
- Shnyukov E.F., Sheremetyev V.M., Maslakov N.A., Kutniy V.A., Gusakov I.N., Trofimov V.V., *Gryazevye vulkany Kerchensko-Tamanskogo regiona* (Mud volcanoes of the Kerch-Taman region), Krasnodar: OOO "Glav-Media", 2005, 176 p. [in Russian].
- Sokol E., Kokh S., Kozmenko O., Novikova S., Khvorov P., Nigmatulina E., Belogub E., Kirillov M., Mineralogy and Geochemistry of Mud Volcanic Ejecta: A New Look at Old Issues (A Case Study from the Bulganak Field, Northern Black Sea), *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 344, 38 p. DOI: 10.3390/min8080344
- Subbota M.I., New data on gases and types of mud volcanoes in the Western Kuban region, *Trudy VNIGNI* (Proceedings of VNIGNI), 1964, vol. 41, pp. 156-178. [in Russian].
- Tsarapkin M.E., Dugarov G.A., Karsten V.V., Gorshkalev S.B., Determination of the seismic quality factor of the productive interval according to the vertical seismic profiling of the Pelyatkinskaya-830 well using the modified spectral ratio method, *GEO-Sibir'* (GEO-Siberia), 2013, vol. 2, pp. 29-34. [in Russian].

*About the authors*

**EGOROV Nikolay Alexandrovich** – Lead Engineer, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1. Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-40. E-mail: nikolay.egorov@ifz.ru

**KRASNOVA Maria Alexandrovna** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1. Moscow, 123242, Russia; researcher, Moscow Institute of Physics and Technology, Institutsky per., 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia. Ph.: +7(499) 254-90-42. E-mail: mkrasnova@ifz.ru

**BELOBORODOV Denis Evgen'evich** – Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-40. E-mail: beloborodov@ifz.ru

**AFINOGENOVA Natalya Alexandrovna** – Junior Researcher, Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Borok, 142, Nekouz district, Yaroslavl region, 152742, Russia. Ph: +7(485) 472-40-24. E-mail: aphina312@mail.ru

**MATVEEV Maksim Alekseevich** – Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-92-05. E-mail: matveevmaksim93@mail.ru