

## ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Фролова Ю.В.<sup>1</sup>, Ладыгин В.М.<sup>1</sup>, Рычагов С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский Государственный университет М.В.Ломоносова (МГУ), Геологический факультет, Москва, Россия; E-mail: [skalka@geol.msu.ru](mailto:skalka@geol.msu.ru)*

<sup>2</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; E-mail: [rychsn@kcs.iks.ru](mailto:rychsn@kcs.iks.ru)*

Настоящее сообщение обобщает результаты петрофизических исследований, проведенных авторами на ряде геотермальных объектов Курило-Камчатского региона (гидротермально-магматические системы Паужетская, Мутновская, вулкана Баранского, вулкана Эбеко) и Исландии. На конкретных примерах рассматриваются возможности и перспективы использования петрофизического анализа при изучении эволюции и механизмов геотермального процесса, уточнении строения геотермальных месторождений, формирующихся в недрах гидротермально-магматических систем.

Создана и проанализирована петрофизическая база данных гидротермально измененных вулканогенных пород (700 образцов). Установлено плавное изменение свойств вулканогенной толщи с глубиной в ходе регионального эпигенеза (вне зоны влияния гидротерм) и зональный характер в пределах геотермальных месторождений. Выявлено резкое отличие по свойствам, степени гидротермальной переработки и характеру проницаемости между эффузивными, экструзивными и субвулканическими (интрузивными) породами - с одной стороны и вулканогенно-обломочными породами (туфы, туффиты) - с другой стороны. Первые, как правило, формируют экранирующие горизонты в структуре геотермального месторождения, реже коллекторы трещинного типа, вторые, обладая повышенной проницаемостью, образуют коллекторы порового, порово-трещинного типа, реже – зоны водоупоров. Показана информативность некоторых петрофизических показателей (гигроскопии, скорости упругих волн, магнитной восприимчивости, анизотропии), двумерных диаграмм рассеяния (плотность-скорость упругих волн, пористость-скорость упругих волн) и кластерного анализа для выделения структурных элементов геотермального месторождения, характеристики их однородности и оценки интенсивности переработки пород. При высоких РТ условиях выявлены различия в изменениях плотности, пористости, структуры порового пространства и акустических характеристик для образцов низко- и высокотемпературных зон геотермального месторождения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 03-05-64842а и 03-05-64044а)

## PETROPHYSICAL PROPERTIES OF HOST ROCKS IN GEOTHERMAL FIELDS

Frolova J.V.<sup>1</sup>, Ladygin V.M.<sup>1</sup>, Rychagov S.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov's Moscow State University, Geological Faculty, Moscow, Russia; E-mail: [skalka@geol.msu.ru](mailto:skalka@geol.msu.ru)*

<sup>2</sup> *Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; E-mail: [rychsn@kcs.iks.ru](mailto:rychsn@kcs.iks.ru)*

This report generalizes the results of petrophysical studies obtained by authors on a number of geothermal fields of Kuril-Kamchatka region and Iceland. The advantages of petrophysical analysis application for investigation of evolution and mechanisms of geothermal process as well as definition of geothermal fields structure are shown.

Petrophysical database of hydrothermally altered volcanic rocks (700 samples) has been established and processed. Properties changes of volcanic rocks along with the depth have different characters for regional epigenesis (out of hydrotherms influence) and geothermal fields being gradual for the former and zonal for the later. Effusive, extrusive and subvolcanic (intrusive) rocks differ significantly from volcanoclastic (tuffs) rocks by properties, intensity of alteration and permeability character. The former form water confining horizons in the structure of geothermal fields, rarely fracture-type aquifers; the later are characterized high permeability and form porous-type aquifers, rarely – water confining layers. Some of petrophysical parameters (hygroscopy, sonic velocity, magnetic susceptibility, and anisotropy), 2D scatterplots (density-sonic velocity, porosity-sonic velocity), and cluster analysis are very informative for a definition of homogenous units within geothermal fields structure and an assessment of hydrothermal alteration intensity. The differences in a character of changes of density, porosity, pore-space structure and sonic velocity have been identified for low- and high-temperature zones of geothermal fields.

This work is performed with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects 03-05-64842a and 03-05-64044a).

## 1. Введение

Одной из основных задач при освоении геотермального месторождения (ГТМ) является детальное изучение его структуры - выявление резервуаров термальных вод, водоупоров, зон перетока гидротермальных растворов, участков парообразования, и т.д. Традиционно, для решения данной задачи используется комплекс геохимических, гидрогеологических и геофизических методов. Исследования, проводимые нами с конца 80-х годов в ряде геотермальных районов Курило-Камчатского региона (Паужетский, Мутновский, о.Итуруп – вулкан Баранского, о. Парамушир – вулкан Эбеко) и Исландии (Ю, ЮЗ районы) показали целесообразность использования петрофизического анализа для изучения природы, эволюции и механизмов геотермального процесса, уточнения и получения дополнительной информации о строении ГТМ [3-5, 11, 13, 15-17].

Под петрофизическими свойствами мы понимаем комплекс физических и механических характеристик горных пород, определяемых лабораторными методами или вычисляемых. В ходе выполнения работ определялись следующие показатели: плотность – общая ( $\rho$ ) и минеральная ( $\rho_s$ ); пористость - общая ( $p$ ), эффективная по воде ( $p_{вод}$ ) и по воздуху ( $p_{возд}$ ); проницаемость ( $K$ ); гигроскопическая влажность ( $W_g$ ); скорости распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) упругих волн; анизотропия; прочность на одноосное сжатие ( $R_c$ ); деформационные характеристики – модуль Юнга ( $E$ ) и коэффициент Пуассона ( $\mu$ ); магнитная восприимчивость ( $\chi$ ); тепловые характеристики – теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность [1, 6, 12]. Определения петрофизических характеристик сопровождались детальным изучением химического и минерального состава пород, их структуры и текстуры, порового пространства, обеспечивая, таким образом, комплексный подход к анализу горных пород, слагающих ГТМ. Отдельно, в

институте Физики Земли РАН, были проведены эксперименты при высоких РТ условиях с целью изучения изменения плотности, пористости, структуры порового пространства и акустических характеристик горных пород [7, 18].

Петрофизический анализ имеет ряд преимуществ. Физические и механические характеристики относительно легко определяются в лабораторных условиях. Они несут количественную информацию о состоянии и однородности горных пород, слагающих ГТМ; отражают степень и характер переработки пород и могут служить критерием при оценке интенсивности гидротермального процесса. Полученные корреляционные взаимосвязи петрофизических характеристик и структурно-минералогических особенностей пород способствуют правильной интерпретации геофизических данных. Некоторые физические характеристики горных пород, в частности, такие как плотность, пористость, проницаемость, тепловые параметры необходимы как вводные данные при численном моделировании геотермальных процессов. Существенным недостатком петрофизического анализа является обязательное наличие керна материала. Однако, эта трудность может быть разрешена при наличии в районе исследований обнажений, позволяющих изучить и опробовать геологический разрез без бурения.

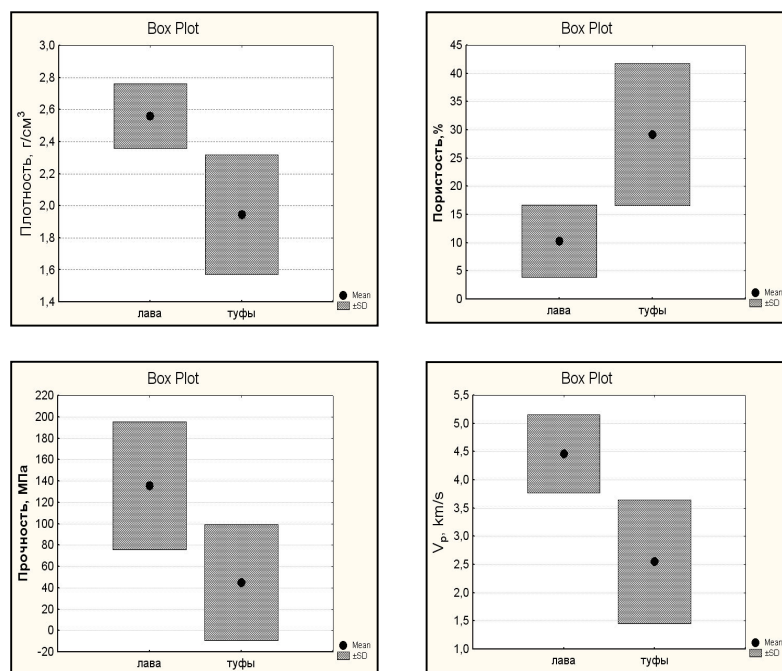
На кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова создана петрофизическая база данных гидротермально измененных вулканогенных пород (порядка 700 образцов). База данных включает вулканогенные породы разного возраста, структуры, текстуры, первичного минерального состава, различной степени и характера гидротермальной переработки. Вулканиды различны по условиям образования – представлены образцы, характеризующие низко- и высокотемпературные гидротермальные системы, а также региональные эпигенетические преобразования. Анализ базы данных позволил выявить некоторые закономерности изменения свойств и структуры порового пространства пород под воздействием гидротермальных растворов и ответить на ряд вопросов, касающихся эволюции, механизмов, интенсивности геотермального процесса. Кроме того, показал целесообразность использования петрофизического анализа для изучения и уточнения структуры геотермального резервуара.

Настоящее сообщение обобщает результаты петрофизических исследований, проводимых авторами на ряде геотермальных объектов. На конкретных примерах рассматриваются возможности и перспективы использования петрофизического анализа при изучении геотермальных процессов и строения месторождений.

## 2. Сравнительная петрофизическая характеристика вулканогенных пород, вмещающих геотермальные месторождения

Известно, что продуктивность и долговечность геотермального резервуара во многом зависит от вмещающих пород – их состава, структуры порового пространства и свойств - в первую очередь пористости и проницаемости. Поскольку ГТМ приурочены к областям активного или недавнего вулканизма, вмещающими породами, как правило, служат вулканиды – лавы, экструзивные, субвулканические образования, вулканогенно-обломочные и вулканогенно-осадочные отложения.

Анализ свойств и структуры порового пространства вулканидов ГТМ выявил резкое отличие между эффузивными, экструзивными и субвулканическими породами с одной стороны и вулканогенно-обломочными породами (туфы, туффиты) с другой стороны (**рис. 1**). В целом, лавы более плотные, прочные, менее пористые и проницаемые, в связи с чем, в меньшей степени подвержены преобразованиям под действием термальных вод. Будучи плотными и непроницаемыми, они обычно формируют экранирующие горизонты в структуре



**Рис. 1.** Сравнительная характеристика свойств лав и туфов

ГТМ. Однако, в тектонически активных зонах, а также в приконтактных частях субвулканических тел они обладают повышенной трещиноватостью, в результате чего испытывают значительное перерождение и могут формировать коллекторы

термальных вод трещинного типа. Примером могут служить приконтактные брекчии субвулканического (интрузивного?) тела диоритов гидротермальной системы вулкана Баранского, о. Итуруп (Океанское ГТМ), измененные под действием горячих флюидов ( $T > 300$  °С) до вторичных кварцитов [4, 9].

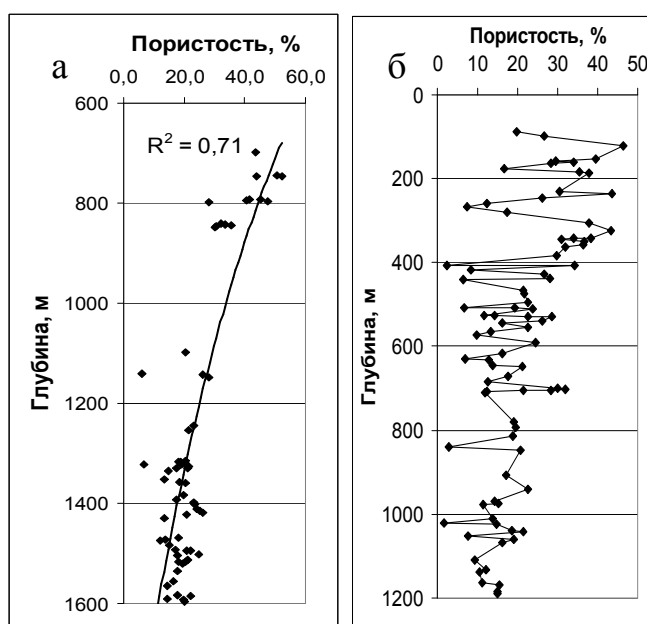
В отличие от лав, туфогенные породы являются менее плотными и прочными. Вследствие высокой первичной пористости и проницаемости они интенсивно перерабатываются термальными водами – первичные минералы замещаются вторичными, более устойчивыми в новых условиях, видоизменяется структура порового пространства и как следствие - меняются физические и механические характеристики. В зависимости от первичных особенностей породы, состава и температуры воздействующих флюидов и, соответственно, типа гидротермальной переработки направленность изменения физических и механических характеристик может быть различна – в одних случаях происходит “улучшение” свойств (уплотнение, цементация, упрочнение, снижение проницаемости), в других - “ухудшение” (уменьшение плотности и прочности, появление вторичной пористости и проницаемости) [3, 11, 13].

Туфогенные породы нередко образуют коллекторы порового типа. Как показали исследования, наибольшей проницаемостью характеризуются псаммитопсефитовые туфы [3]. Ярким примером коллектора порового типа является толща псефитовых туфов ( $N_2^3$ - $Q_1$  Раи<sub>2</sub>) Паужетского ГТМ. Тонкообломочные (алевритовые и пелитовые) туфы и туффиты, хотя и являются высокопористыми (до 30-40 %), но за счет малого размера пор обладают пониженными значениями проницаемости. Для крупнообломочных туфов и туффитов характерен порово-трещинный тип проницаемости. При этом границы крупных обломков представляют собой ослабленные зоны, по которым возможно движение флюидов сквозь толщу.

### **3. Закономерности изменения вулканогенных пород в процессе регионального эпигенеза и в пределах ГТМ**

В ходе исследований изучались и сравнивались закономерности преобразований вулканитов при региональном эпигенезе и в пределах гидротермально-магматических систем. Изучение последовательности преобразования туфогенных пород о. Итуруп ( $N_2$ - $Q_1$ ) и Исландии ( $N_2$ - $Q_3$ ) в ходе регионального эпигенеза выявило ряд общих закономерностей [13, 16, 17]. В

частности, с увеличением глубины (до 1-1,5 км) и возраста наблюдается постепенное заполнение межобломочного пространства вторичными минералами с последовательной сменой типов цемента: контактовый – пленочный – поровый – порово-базальный. Меняются состав и структура глинистых минералов: смектит с ячеистой микроструктурой – корренсит – хлорит с листоватой микроструктурой. Происходит относительно плавное изменение физических и механических параметров пород: уплотнение и упрочнение, снижение проницаемости, повышение значений акустических характеристик (рис. 2а).



**Рис. 2.** Изменение пористости по разрезу вулканогенной толщи района вулкана Баранского: а – регионально измененная толща, вне зоны влияния гидротерм (Скв. 50), б – гидротермально измененная толща (Скв. 54)

С глубины около 1 км начинается интенсивная перекристаллизация первичного вулканогенного материала и формирование вторичной пористости, что не отражается на увеличении проницаемости.

В отличие от регионального эпигенеза в пределах ГТМ в результате избирательного воздействия термальных вод различного состава, кислотности-щелочности и температуры вмещающая толща приобретает зональное строение, как по минералогическим, так и по петрофизическим данным – монолитные, плотные, прочные горизонты чередуются с проницаемыми, разуплотненными, “слабыми” слоями [4, 11]. Строение вмещающей толщи можно охарактеризовать как “слоеный пирог” (рис. 2б).

На графике рассеяния  $\rho-V_p$ , построенного для пород Океанского ГТМ

показано отличие свойств пород, вмещающих геотермальное месторождение и пород, находящихся за его пределами, вне зоны влияния гидротерм (рис. 3).

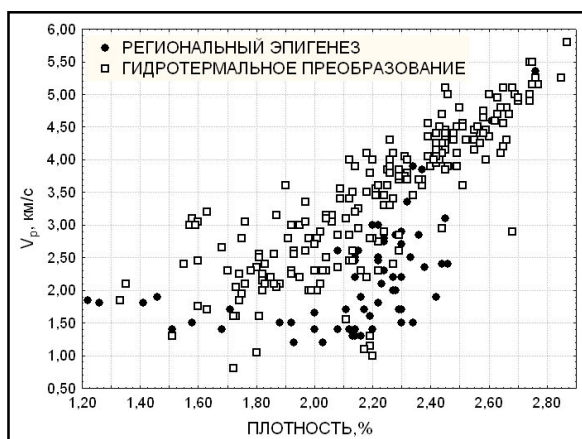


Рис. 3. График рассеяния значений плотности и  $V_p$  (Океанское геотермальное месторождение, о. Итуруп)

#### 4. Информативность петрофизических показателей для выделения структурных элементов геотермального месторождения

Ряд петрофизических показателей, а также двумерные графики рассеяния могут быть использованы для выделения структурных элементов ГТМ, характеристики их однородности и оценки интенсивности гидротермальной переработки пород [14].

**4.1. Плотностные и акустические характеристики.** Соотношение значений плотностных и акустических характеристик может служить критерием выделения гидротермальных зон. В качестве примера приведен график рассеяния  $\rho$ - $V_p$  для Паужетского ГТМ (рис. 4). Каждой зоне на диаграмме соответствует самостоятельная область. Особо выделяется зона цеолитизации - основной продуктивный горизонт месторождения. Породы этой зоны характеризуются аномально низкими значениями  $V_p$  при “средних” значениях плотности. Аналогичное явление пониженных значений скоростей было отмечено и для цеолитизированных туфов Исландии [16].

**4.2. Магнитные характеристики.** Низкие значения магнитной восприимчивости ( $0,01$ - $0,02 \cdot 10^{-3}$  СИ) характерны для интенсивно окварцованных пород. Таким образом, по низким значениям магнитной восприимчивости (в сочетании с высокими значениями прочности) были откартированы: зона вторичных кварцитов – предположительно высокотемпературный продуктивный горизонт с трещинной проводимостью в приконтактной зоне субвулканического тела (Океанское ГТМ) [4]; зона “вскипания гидротерм”, сложенная кварц-адуляровыми породами,

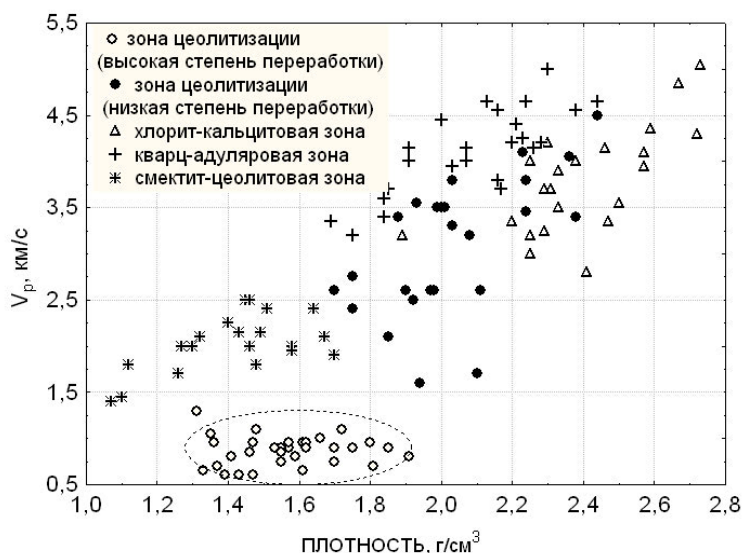


Рис. 4. Диаграмма рассеяния  $\rho$ - $V_p$  для пород Паужетского ГТМ

приуроченная к участкам повышенной трещиноватости и разломам, по которым происходит подъем и вскипание термальных вод (Паужетское ГТМ) [11].

**4.3. Гигроскопическая влажность.** Гигроскопическая влажность ( $W_g$ ) характеризует содержание прочносвязанной воды, образующейся в породе в результате процессов адсорбции молекул воды из паров, и косвенно отражает количество, тип и дисперсность глинистых минералов. Этот показатель легко определяется в лаборатории как относительная потеря в весе при высушивании образца при температуре  $105^{\circ}\text{C}$ . Исследования гигроскопической влажности пород, слагающих геотермальные месторождения, показали, что значения  $W_g > 2\%$  типичны для зоны аргиллизации, формирующейся под действием низкотемпературных гидротермальных процессов ( $T < 150^{\circ}\text{C}$ ). Несмотря на высокую пористость (до 30-40%) и низкую плотность ( $1.5-1.8 \text{ г/см}^3$ ) аргиллизированные породы образуют, как правило, верхний водоупор в структуре геотермальных месторождений. Причина в том, что основными минералами аргиллизированных пород являются монтмориллонит или корренсит. Эти глинистые минералы набухают при водонасыщении, закрывая межобломочные поры и трещины, формируя при этом вязкий, пластичный водонепроницаемый слой. На примере геотермального месторождения вулкана Баранского (рис. 5) показано как диагностируется зона гидротермальных аргиллитов и, соответственно, верхний экранирующий горизонт по изменению гигроскопической влажности без проведения рентгеноструктурного анализа или гидрогеологических исследований [14].



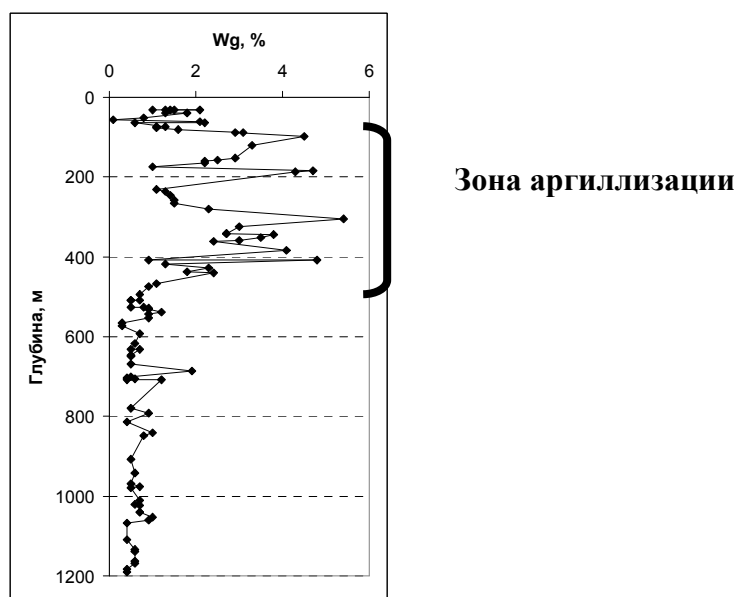


Рис. 5. Изменение гигроскопической влажности по разрезу скважины 54 (Океанское геотермальное месторождение, о. Итуруп)

**4.4. Упругая анизотропия и акустическая эмиссия.** Получены новые данные о строении ГТМ на основе изучения упругой анизотропии пород с помощью акустополариметрии [2] и оценки действовавших в массиве напряжений методом акустической эмиссии АЭ (эффекты памяти) [8, 14]. Исследования проводились на керне скважины 54 (глубина 1200 м), пробуренной в пределах высокотемпературной гидротермальной системы вулкана Баранского (о. Итуруп, Южные Курилы). По оценке упругой анизотропии установлено, что толща пород имеет зональное строение: по разрезу наблюдается смена различных типов анизотропии – от сложно ортотропного до поперечно-изотропного и изотропного. Причем появление изотропии связано с зонами “вскипания гидротерм”. Анализ напряжений методом АЭ выявил три уровня напряжений. При этом наиболее интересные результаты вновь были получены для пород зоны “вскипания гидротерм”: для этих пород оказалось невозможным восстановить напряжения. Этот факт хорошо согласуется с утверждениями многих исследователей: если порода подвергается (или подвергалась в прошлом) гидростатическому давлению, то эффекты памяти по напряжениям в ней отсутствуют [2, 14]. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая часть массива находится в условиях гидростатического давления. Гидротермальные процессы в этой зоне остаются активными и в настоящее время, а анизотропия, характерная для всего разреза, здесь исчезает в результате глубокой, всесторонней и быстрой переработки пород.

## 5. Применение кластерного анализа для выделения петрофизически однородных групп пород

С 2002 г. авторами ведутся работы по изучению состава, вторичных преобразований, структуры порового пространства и петрофизических свойств гиалокластитов Исландии, которые слагают мощные толщи и, обладая хорошими коллекторскими свойствами, нередко вмещают как холодные, так и термальные воды [16]. Гиалокластиты крайне неоднородны по свойствам и характеризуются широким размахом их значений - пористости (15-57%), проницаемости ( $10^{-3}$ - $6 \cdot 10^3$  мД), прочности (1-100 МПа),  $V_p$  (1,5-4,5 км/с). Чтобы понять природу петрофизической неоднородности гиалокластитов и выделить однородные группы был проведен кластерный анализ. Кластерный анализ обычно используется для первичного классифицирования данных и выделения однородных групп, когда процесс исследования находится на описательной стадии [10]. Применялся метод К-средних. С вычислительной точки программа начинается с К случайно выбранных кластеров, а затем изменяет принадлежность объектов к ним, чтобы 1) минимизировать изменчивость внутри кластеров; 2) максимизировать изменчивость между кластерами. Выделенные кластеры характеризуются средними значениями каждой переменной, положенной в основу анализа. В основу кластерного анализа были положены 8 параметров – плотность, общая пористость, эффективная пористость по воде, эффективная пористость по воздуху, гигроскопическая влажность, плотность твердой фазы, скорость распространения продольных волн, прочность на одноосное сжатие. В результате кластерного анализа было получено 5 однородных групп (кластеров) гиалокластитов (**рис. 6**). Полученные группы пород были сопоставлены с геологическими и петрографическими факторами. Сопоставление выявило хорошую корреляцию петрофизических групп и стадий переработки, каждая из которых характеризуется определенным типом и составом цемента и набором вторичных минералов. Комплексный анализ свойств и петрографических особенностей позволил понять последовательность и механизмы вторичных преобразований, включая изменение структуры порового пространства и проницаемости. Помимо стадий переработки, петрофизические группы обнаружили хорошую корреляцию с возрастом и глубиной погружения гиалокластитовой толщи (**табл. 1**).

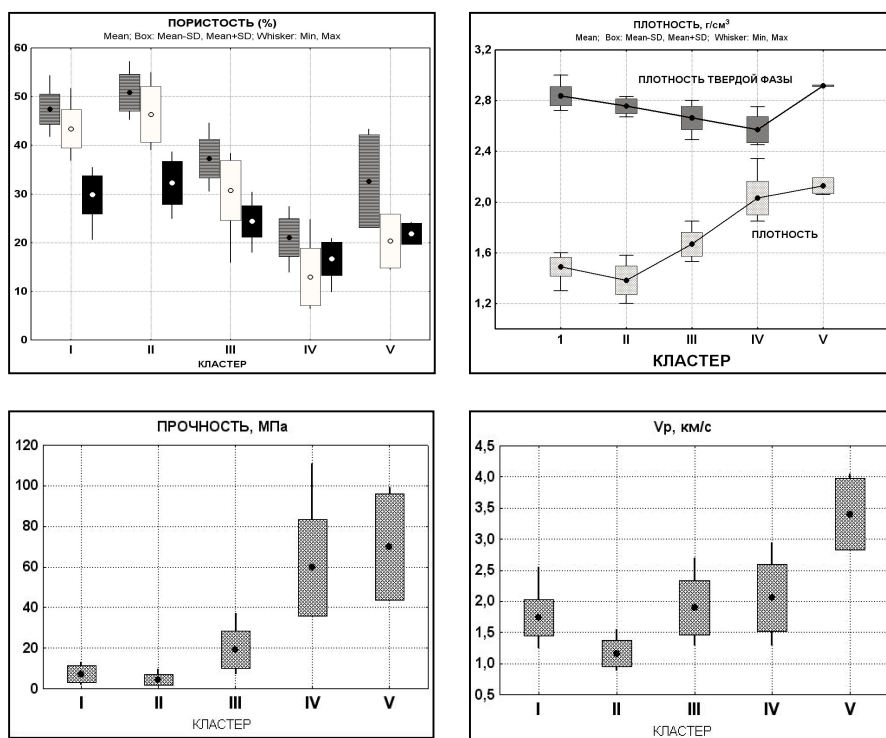


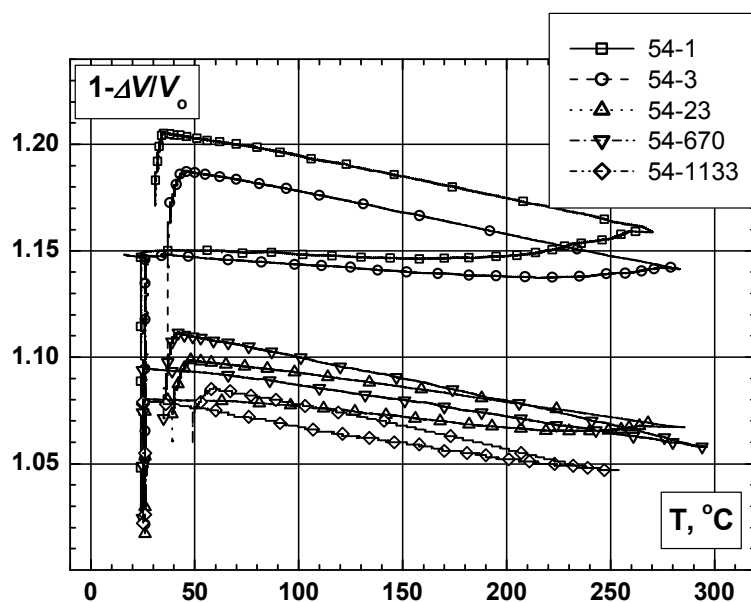
Рис. 6. Характеристика петрофизических групп (кластеров), выявленных среди гиалокластитов. \* На первом графике: штрих – общая пористость, белый цвет – пористость эффективная по воздуху, черный цвет – пористость эффективная по воде

Таблица 1. Характеристика кластеров

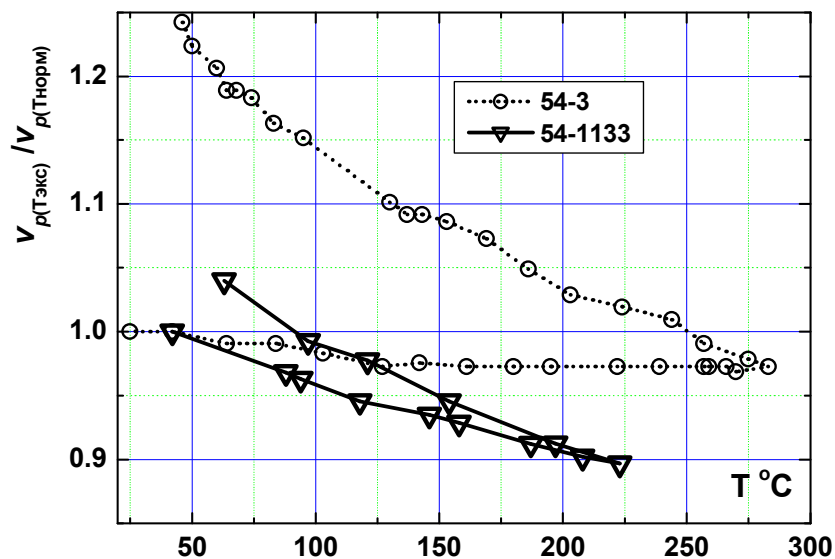
Кластер	Тип цемента	Вторичные минералы	Возраст (млн. лет), глубина погружения (м)	Проницаемость, мД
I	контактный	гель-палагонит	15-125 тыс.; погружения не было	$3,3 \cdot 10^3$
II	пленочный	гель-палагонит + слоистый палагонит,	<0,3; погружения не было	$3,9 \cdot 10^3$
III	порово-пленочный	палагонит, смектит		$6,1 \cdot 10^2$
IV	поровый	палагонит, смектит/корренсит, цеолиты, кальцит	<0,3-2; 0-700	55
V	порово-базальный с перекристаллизацией первичного стекла	корренсит/хлорит, кальцит, эпидот, лейкоксен	2-2,5; ~1000	$3 \cdot 10^{-2}$

### 6. Эксперименты при повышенных РТ условиях

Сотрудниками института Физики Земли РАН на установке высоких РТ были проведены эксперименты по изучению изменения плотности, пористости, структуры порового пространства и скорости упругих волн туфов геотермального месторождения Океанское (о. Итуруп) [7, 18].



**Рис. 7.** Сжатие образцов туфов при повышенных РТ условиях в закрытой системе. Образцы 54-1 и 3 отобраны из верхних горизонтов (30-40 м) Океанского ГТМ; образцы 54-23, 670 и 1133 отобраны с глубины более 500 м из средне-высокотемпературной зоны.



**Рис. 8.** Изменение скорости ультразвука в двух образцах при нагреве в изобарических условиях ( $P=0.7$  ГПа).

Измерения проводились в закрытой системе в процессе нагревания в изобарических условиях при воздействии давления ( $P$  до 0,7 ГПа) и температуры ( $T$  до 300<sup>0</sup>С). При высоких  $PT$  условиях выявлены различия в изменениях плотностных и акустических характеристик для образцов низко- и высокотемпературных зон ГТМ. Полученные данные об изменении плотности в процессе изобарического нагрева показали, что деформация туфов, залегающих на глубине более 500 м и испытавших средне-высокотемпературную гидротермальную переработку, происходит линейно с изменением температуры (**рис. 7**). Между тем, как у близповерхностных туфов из низкотемпературных зон при нагреве есть ярко выраженный участок нелинейного изменения объема с температурой с четко выраженным минимумом в интервале 150-250<sup>0</sup>С. При этом величина деформации для близповерхностных образцов значительно больше. Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что вследствие воздействия на породу высокотемпературного гидротермального процесса и литостатического давления произошли необратимые пластические деформации, которые привели к перестройке структуры и достижению плотной упаковки. Характер изменения скоростей упругих волн при воздействии температуры для близповерхностного образца низкотемпературной зоны и глубинного образца высокотемпературной зоны подтверждают это предположение. После цикла нагрева-охлаждения в первом случае происходит значительное увеличение значения  $V_p$ , тогда как во втором случае отклонение  $V_p$  несущественно (**рис. 8**).

### **Заключение**

1. Установлено плавное изменение свойств вулканогенной толщи в ходе регионального эпигенеза (вне зоны влияния гидротерм) и зональный характер в пределах геотермальных месторождений.

2. Выявлено резкое отличие по свойствам, степени гидротермальной переработки и характеру проницаемости между эффузивными, экструзивными и субвулканическими (интрузивными) породами - с одной стороны, и вулканогенно-обломочными породами - с другой стороны.

3. Показана информативность некоторых петрофизических показателей ( $W_g$ ,  $V_p$ ,  $\chi$ , анизотропии), двумерных диаграмм рассеяния ( $\rho$ - $V_p$ ,  $p$ - $V_p$ ) и кластерного анализа для выделения структурных элементов геотермальных месторождений,

характеристики их однородности и оценки интенсивности переработки пород.

4. При высоких РТ условиях выявлены различия в изменениях плотности, пористости, структуры порового пространства и акустических характеристик для образцов низко- и высокотемпературных зон геотермальных месторождений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 26450.2-85.** Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. Государственный комитет СССР по стандартам. М., 1985, 12 с.
2. **Горбачевич Ф.Ф.** Акустополярископия горных пород. Апатиты, 1995.
3. **Ладыгин В.М., Рычагов С.Н., Васильева (Фролова) Ю.В., Румянцева Н.А., Вебер С.Н.** Петрофизические свойства метасоматитов Паужетского месторождения парогидротерм (Южная Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*, 1991, №6, С. 95-110.
4. **Ладыгин В.М., Рычагов С.Н.** Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: блоковая структура и интенсивность гидротермально-метасоматического перерождения пород по петрофизическим данным // *Вулканология и сейсмология*, 1995, №3, С. 28-44.
5. **Ладыгин В.М., Округин В.М., Фролова Ю.В.** Петрофизические свойства неоген-четвертичных пород района Мутновской геотермальной станции (Южная Камчатка). Труды Международного геотермального научно-технического семинара, Петропавловск-Камчатский, 9-15 августа 2004. Электронная публикация.
6. **Ломтадзе В.Д.** Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990, 328 с.
7. **Насимов Р.М., Дьяур Н.И., Фролова Ю.В., Ладыгин В.М.** Нелинейные изменения плотности гидротермально-измененных туфов при нагреве в изобарических условиях // *Наука и технология в России*, N 4-5 (70-71) 2004, С. 8-14.
8. **Панасьян Л.Л., Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Кривошеева З.А.** Упругая анизотропия метасоматитов Океанского парогидротермального месторождения // *Вестн. Моск. ун-та. Сер 4. Геология*. 2000, N 3, С. 47-54.
9. **Рычагов С.Н.** Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: модель геологической структуры // *Вулканология и сейсмология*, 1993, N 2, С. 59-74.
10. **Самарин Е.Н., Бершов А.В., Фоменко И.К.** Курс лекций по методам статистической обработки инженерно-геологической информации. Учебное пособие по курсу "Математические методы и ГИС-технологии в инженерной геологии" Изд-во МГУ, 2004.
11. **Структура гидротермальной системы.** М: Наука, 1993. 298 с.
12. **Трофимов В.Т., Королев В.А.** Методы изучения физических свойств грунтов. В кн.: Практикум по грунтоведению. 1993, С. 168-214.
13. **Фролова Ю.В., Голодковская Г.А., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н.** О природе инженерно-геологических свойств гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона // *Вестн. Моск. ун-та. Сер 4. Геология*. 1999, N 3, С. 36-42.
14. **Шкуратник В.Л., Лавров А.В.** Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели. М., 1998.
15. **Frolova J., Ladygin V., Rychagov S.** Geothermal reservoir study through petrophysical data // *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol.25, 2001, Pp. 401-403.
16. **Frolova J., Ladygin V., Franzson H., Sigurðsson O., Stefánsson V., Shustrov V.** Petrophysical Properties of Fresh to Mildly Altered Hyaloclastite Tuffs // *Proceedings of WGC 2005. Turkey, Antalya, 24-29 April, electron version*.
17. **Ladygin V., Frolova J, and Rychagov S.** Formation of composition and petrophysical properties of hydrothermally altered rocks in geothermal reservoir // *Proceeding of the World Geothermal Congress 2000. Japan, 2000. Pp. 2695-2699.*
18. **Rashid M. Nasimov, Nikolay I. Diaur, Yuri S. Genshaft, Artur Ya. Saltykovsky, Julia V. Frolova, Vladimir M. Ladygin** High PT Experimental Studies of Hydrothermally Altered Tuffs, Kuril Islands, Russia. // *Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005*