

## Петрофизическая характеристика вулканогенных пород и продуктов их гидротермального изменения Кошелевского вулканического массива

Кушнарев М.С.<sup>1</sup>, Фролова Ю.В.<sup>1</sup>, Удовкин Е.В.<sup>1</sup>, Рычагов С.Н.<sup>2</sup>

## Petrophysical characteristic of volcanogenic rocks and products of their hydrothermal change of the Koshelevsky volcanic massif

Kushnarev M.S., Frolova J.V., Udovkin E.V., Rychagov S.N.

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва;

e-mail: kushnarevms@ty.msu.ru

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Рассматриваются петрофизические свойства коренных и гидротермально преобразованных пород Кошелевского вулканического массива на участке, прилегающем к Верхне-Кошелевскому термальному полю. Проанализированы изменения физико-механических свойств пород при их опалитизации и вторичной кварцитизации.

### Введение

Кошелевский вулканический массив расположен на юге Камчатки, вблизи Охотского побережья. Он представляет собой хребет, протягивающийся в субширотном направлении на 5-6 км, сформированный несколькими слившимися и сильно разрушенными вулканическими постройками четвертичного и плиоцен-четвертичного возраста [1]. Массив входит в структуру Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района [2] и вмещает две крупные группы термоаномалий – Нижне- и Верхне-Кошелевскую.

Объектом настоящего исследования является Кошелевский массив, преимущественно его участок, прилегающий к Верхне-Кошелевскому термальному полю (ВК). Оно расположено в обширной эрозионной котловине (цирке), ограниченной с трех сторон – юга, востока и запада – серией вытянутых гряд и изолированных вершин вулканических сооружений (рис. 1) [1]. Чашеобразное понижение достигает около 2 км в ширину.



Рис. 1. Эрозионная котловина в районе ВК и обрамляющие ее гряды и пики. Цветными линиями показаны гряды различного простираения; стрелками показаны места отбора образцов (фото И.А. Нуждаева).

Цель настоящей работы заключается в изучении петрофизических свойств пород Кошелевского массива и их петрографических особенностей для последующего выявления возможных взаимосвязей.

### **Материалы и методы**

В полевой сезон 2025 г. в районе ВК была собрана представительная коллекция образцов. Опробование проводилось преимущественно вдоль гряд, оформляющих контур эрозионной котловины, с целью максимально полно охарактеризовать разнообразие вулканогенных пород и их гидротермально измененных разновидностей. В большинстве точек измерены магнитная восприимчивость пород (каппаметр КТ-6) и высота упругого отскока (молоток Шмидта модели 225А) – показатель, косвенно характеризующий прочностные и деформационные характеристики горной породы.

В лаборатории из образцов подготовлены пробы цилиндрической формы ( $d=2.8-2.9$  см), которые далее использованы для определения физических (плотность, пористость, водопоглощение, скорости распространения Р- и S-волн), деформационных (модуль упругости, коэффициент Пуассона) и прочностных (прочность при одноосном сжатии, прочность на разрыв) свойств. Все определения выполнены по стандартным методикам [3]. Для всех образцов подготовлены и описаны шлифы. Минеральный состав уточнен методом рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр Ultima-IV «Rigaku», аналитики В.Л. Косоруков, В.В. Крупская). Химический анализ выполнен в ЦКП ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа».

### **Результаты и обсуждение**

В результате опробования массива по контуру эрозионной котловины заключено, что наиболее распространенными являются вулканогенные породы среднего состава. Хотя в верхних частях хребта современные паропроявления отсутствуют, существует множество участков, в прошлом подвергшихся интенсивной вторичной переработке гидротермальными процессами. Измененные породы на исследуемой территории представлены в основном опалитами – от белых фарфоровидных с высокими содержаниями опала и кристобалита до пестрых псевдоморфных, наследующих структурно-текстурные особенности коренных пород. Кроме того, встречаются вторичные кварциты, отличающиеся от опалитов условиями формирования – главным образом температурой и глубиной – и, как следствие, большими значениями прочностных характеристик.

Если крайние разности ряда вулканит → измененный вулканит → опалит/вторичный кварцит определяются однозначно еще на этапе макроскопического анализа, то переходные формы не всегда можно достоверно установить даже по результатам химического анализа, так как превращение породообразующих минералов исходной породы в кремнезем только лишь смещает точку на TAS-диаграмме в сторону кислых разновидностей.

Помимо химического состава гидротермальная переработка затрагивает структурные связи: кристаллизационные контакты переходят в цементационные [3], и чем больше контактов затронуто, тем более измененная и менее прочная перед нами порода. Это обстоятельство позволяет оценивать степень опалитизации (вторичной кварцитизации) по любым показателям физико-механических свойств, например, величине упругого отскока молотка Шмидта (R-value). В комбинации с анализом магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) отсекаются случаи отличия деформационных свойств за счет разной степени трещиноватости или качества исследуемой поверхности, так как даже малейшее гидротермальное воздействие на пара- и ферромагнитные минералы резко снижает суммарную магнитную восприимчивость породы, не сильно при этом затрагивая ее физико-механические свойства (рис. 2).

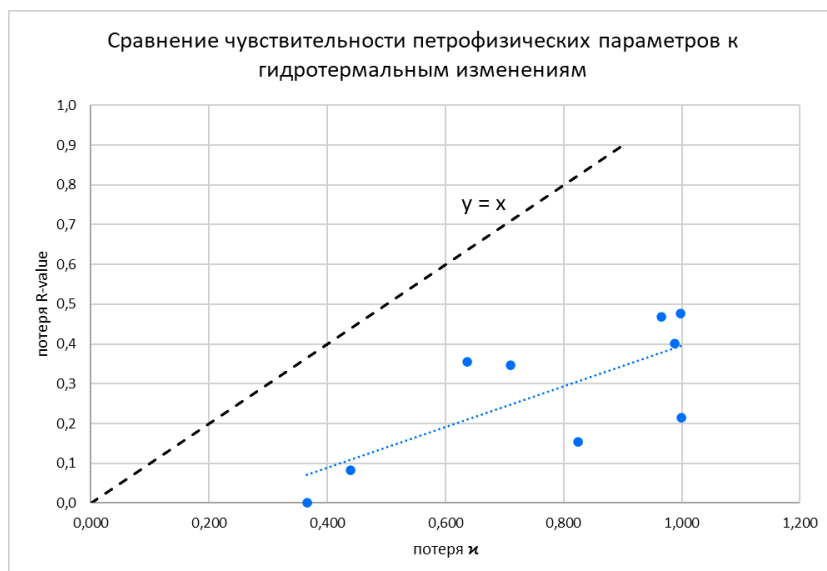


Рис. 2. Сравнение чувствительности R-value и  $\kappa$  к гидротермальным изменениям на примере вулканитов среднего состава, подвергшихся вторичной кварцитизации.

При движении по Западной гряде с севера на юг наблюдается ярко выраженная неоднородность физических свойств пород, обусловленная чередованием свежих магматических разностей и зон интенсивных гидротермальных изменений. Крайняя северная часть хребта характеризуется достаточно высокими значениями ( $R\text{-value}=34.2\text{-}36.5$ ) и высокой магнитной восприимчивостью ( $\kappa=20.68\text{-}26.07 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ), что соответствует неизменным андезидацитам, плавно переходящим выше по склону в андезиты. Однако чуть южнее фиксируется резкое ухудшение свойств: высота упругого отскока снижается ( $R\text{-value}=23.67\text{-}26.7$ ), а магнитная восприимчивость падает до минимальных значений ( $\kappa=0.09\text{-}0.50 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ). Эта зона маркирует выход вторичных кварцитов по трещине северного простирания. Наиболее контрастный переход наблюдается между этой зоной и участком, расположенным непосредственно южнее в конце седловины: здесь магнитная восприимчивость возрастает более чем в 360 раз, а прочность увеличивается до максимальных для западной гряды значений ( $R\text{-value}=39.60\text{-}40.90$ ). Данный участок, вероятно, представляет собой нетронутое субвулканическое тело. Переход в южную гряду фиксируется незначительным падением прочностных и магнитных свойств, что, скорее всего, связано с выветрелостью участка массива, а не с его гидротермальной переработанностью.

При движении по восточной гряде с севера на юг наблюдается мозаичное распределение физических свойств при общем тренде к ухудшению показателей в центральной части профиля. На самом севере блока фиксируются породы с крайне низкой магнитной восприимчивостью ( $0.07\text{-}0.25 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ) – это привершинная зона вулкана Валентин, полностью опалитизированная. Чуть южнее появляется разность с резко возросшей магнитной восприимчивостью ( $14.60 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ), указывающая на локальное сохранение первичных магнитных минералов – это ряд средне- и слабоизмененных андезитов. Далее к югу вновь наблюдается спад магнитной восприимчивости до минимальных значений ( $0.45 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ). В центральной части хребта, еще южнее, залегают туфы, характеризующиеся крайне низкой величиной упругого отскока (1.90) при слабой магнитной восприимчивости ( $2.72 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ) – это наиболее слабые породы всей восточной гряды. Южнее, на следующей точке, величина упругого отскока достигает максимальных для гряды значений (35.30) при умеренной магнитной восприимчивости ( $5.11 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ), что соответствует слабоизмененному андезибазальту. Завершает профиль самая южная точка, где порода демонстрирует среднюю величину упругого отскока (28.80) при достаточно высокой магнитной восприимчивости ( $14.78 \cdot 10^{-3}\text{СИ}$ ). Таким образом, восточная гряда характеризуется плавной сменой слабых измененных разностей склона вулкана Валентин на крепкие магматические породы южной части хребта.

При движении по южной гряде с запада на восток наблюдается наиболее контрастное распределение свойств с экстремальными значениями как величины упругого отскока, так и магнитной восприимчивости. На западе фиксируются высокие значения обоих параметров: величина упругого отскока достигает 44.60 при магнитной восприимчивости  $25.80 \cdot 10^{-3}$ СИ, что соответствует свежему андезиту. Восточнее, на следующей точке, наблюдается еще более высокая величина упругого отскока (46.90) при сохраняющейся высокой магнитной восприимчивости ( $25.63 \cdot 10^{-3}$ СИ) – это максимальные показатели прочности для всего массива. Далее к востоку расположена зона резкого контраста: при величине упругого отскока 43.63-43.50 магнитная восприимчивость варьирует от  $28.76 \cdot 10^{-3}$ СИ до рекордных  $40.70 \cdot 10^{-3}$ СИ. Однако буквально рядом, чуть восточнее, фиксируются породы с аномально низкой магнитной восприимчивостью: на одной точке она падает до  $0.01-0.09 \cdot 10^{-3}$ СИ при величине упругого отскока 35.00. Завершает профиль самая восточная точка блока, где фиксируется величина упругого отскока 33.40 при высокой магнитной восприимчивости  $24.72 \cdot 10^{-3}$ СИ.

Таким образом, южная гряда представляет собой ядро массива с максимально прочными и неизменными породами, в восточной части которой отбивается контрастный переход в склон вулкана Валентин, на котором чередуются малопрочные опалиты и прочные вторичные кварциты.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований впервые получена комплексная петрофизическая характеристика пород Кошелевского вулканического массива в обрамлении Верхне-Кошелевского термального поля. Установлено, что гидротермальные изменения неодинаково влияют на физические свойства пород: магнитная восприимчивость является сверхчувствительным индикатором даже начальных стадий переработки, снижаясь в сотни и тысячи раз, тогда как величина упругого отскока уменьшается медленнее и может длительное время сохраняться на высоком уровне благодаря окремнению. Вдоль трех основных гряд, обрамляющих эрозионную котловину, выявлено закономерное чередование свежих и измененных разностей: в центральных частях гряд залегают свежие вулканиты с максимальными значениями прочности и магнитности, а на флангах и в зонах нарушений локализованы участки интенсивной опалитизации и вторичной кварцитизации. Наиболее контрастные переходы свойств зафиксированы на контактах свежих вулканитов с зонами изменений, где перепады магнитной восприимчивости достигают трех порядков. Южная гряда представляет собой ядро массива с максимальными значениями упругого отскока и рекордной магнитной восприимчивостью, а ее восточная часть маркирует переход к склону вулкана Валентин, где развиты малопрочные опалиты.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова с использованием оборудования (дифрактометр Ultima-IV «Rigaku»), приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета, а также на основании темы НИР ИВиС ДВО РАН № FWME-2024-0005.

### **Список литературы**

1. Вакин Е.А., Декусар З.Б., Сережников А.И., Спиченкова М.В. Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 58-84.
2. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
3. Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 222 с.