

**Преобразование андезитов в разрезе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка)****Ю.В. Фролова<sup>1</sup>, М.С. Чернов<sup>1</sup>, С.Н. Рычагов<sup>2</sup>, В.Н. Соколов<sup>1</sup>, А.М. Мосин<sup>1</sup>, Р.А. Кузнецов<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва,**e-mail: ju\_frolova@mail.ru*<sup>2</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,*

Рассматриваются особенности преобразования вулканогенных пород в разрезе Восточно-Паужетского термального поля Паужетской гидротермальной системы. Приводится характеристика состава и свойств исходных андезитов и продуктов их гидротермальной переработки. Показано зональное строение толщи гидротермальных глин, образованной по андезитам, и проанализировано изменение минерального состава и свойств пород по разрезу.

**Характеристика объекта исследования**

Паужетское геотермальное месторождение расположено на юге полуострова Камчатка. Здесь с 1966 г. эксплуатируется первая в СССР ГеоТЭС. Геологическое строение Паужетской гидротермальной системы детально рассмотрено в работах [1,3,5]. Вмещающими породами являются вулканогенные и вулканогенно-осадочные отложения плиоцен-плейстоценового возраста, которые интенсивно перерабатываются под действием термальных флюидов. За счет разгрузки глубинного тепла, на дневной поверхности сформировано несколько термальных полей. Одним из них является Восточно-Паужетское термальное поле. Оно находится на западном склоне Камбального вулканического хребта. Как и другие поля Паужетской гидротермальной системы, оно приурочено к кольцевому тектоно-магматическому поднятию четвертичного возраста [5] и трассирует разрывные тектонические нарушения внутри этого блока. Поле сформировано на пологом склоне в долине руч. Лучший на абсолютных отметках 290–300 м. Основной участок поля имеет размер 120 × 60 м и выделяется парящими грунтами, прогретыми до 105 °С на глубине 0,5–0,8 м, и парогазовыми струями (до 98–100 °С на устьях). Разгружающиеся термальные воды кислые сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные с широким катионным составом, общая минерализация не превышает 0,8 г/л [4]. Термальное поле характеризуется естественным термодинамическим режимом, поскольку находится на удалении 1-2 км от эксплуатируемых участков месторождения, в отличие от других полей месторождения, которые за период эксплуатации (с 1966 г.) изменились из-за падения уровня термальных вод (исчезли гейзеры, остыли и покрылись растительностью крупные участки разгрузки гидротерм).

Проходка горных выработок (шурфов и скважин, глубиной до 9 м) показала, что Восточно-Паужетское поле сложено гидротермальными глинами, имеющими различную мощность. Толща глинистых грунтов Центрального участка поля характеризуется малой мощностью (до 1,5–2,0 м); в этой части поля в настоящее время происходит интенсивная аргиллизация пород. На краю участка в относительно «спокойном» блоке (отличающимся низкими температурами грунтов на поверхности, отсутствием парогазовых струй и т.п.) вскрыт разрез гидротермальных глин глубиной 4 м. Изучив особенности состава, структуры и свойств толщи, было сделано заключение, что гидротермальные глины сформировались за счет перерождения *in situ* коренных горных пород – андезитов, относящихся к лаво-экструзивному комплексу завершающего этапа развития Камбального вулканического хребта и перекрывающих Верхне-Паужетскую подсвиту [5].

### Состав и свойства исходных пород

Исходные андезиты, на которых сформировано термальное поле, имеют порфировую структуру и массивную текстуру. Порфировые вкрапленники представлены плагиоклазами, в меньшем количестве пироксенами. Кристаллы плагиоклаза относительно свежие, наблюдаются следы выщелачивания и незначительной цеолитизации. Моноклинные пироксены свежие, ромбические – замещены глинистыми минералами хлоритового, хлорит-сметитового состава. Основная масса интерсертально-гиалопилитовая, на отдельных участках цеолитизирована (рис. 1). В породе наблюдаются тонкие кварц-карбонатные прожилки. Андезиты очень плотные  $\rho=2,57-2,68$  г/см<sup>3</sup>, низкопористые  $n=5,3-7,5\%$ , прочные ( $Rc=85-100$  МПа), слабдеформируемые ( $Ey=33-42$  ГПа). Разрушение при сжатии имеет хрупкий характер. Цеолитизация основной массы несколько снижает плотность твердой фазы с 2,87 г/см<sup>3</sup> до 2,71 г/см<sup>3</sup>; на других свойствах заметно не отражается.

*Преобразование андезитов.* Характерной особенностью массива андезитов является очень неравномерная переработка в результате воздействия парогидротерм. Основным процессом является гидротермальная аргиллизация, в результате которой первичные компоненты в различной степени замещаются смектитами, цеолитами, опалом, кварцем, кальцитом, пиритом; характерны псевдоморфозы вторичных минералов по плагиоклазу; многочисленные прожилки и поры выполнены опалом, кварцем, кальцитом, пиритом. Верхний горизонт андезитов брекчирован, матрикс выполнен гидротермальными минералами – кремнистыми, глинистыми, при участии цеолитов и кальцита (рис. 2). По мере изменения пород наблюдается последовательное снижение их плотности  $2,57-2,68 \rightarrow 1,95-2,17 \rightarrow 1,24$  г/см<sup>3</sup> и увеличение пористости  $5,2-7,5 \rightarrow 19-28 \rightarrow 47\%$ . При этом существенно уменьшаются их упругие свойства ( $Ey$ ) от 33-42 до 4-7 ГПа и прочность  $Rc$  85-100  $\rightarrow$  8-40  $\rightarrow$  0,8 МПа. Хрупкий характер разрушения сменяется на хрупко-пластичный. Вследствие развития глинистых минералов породы становятся гигроскопичными ( $W_2$  до 6-7%).

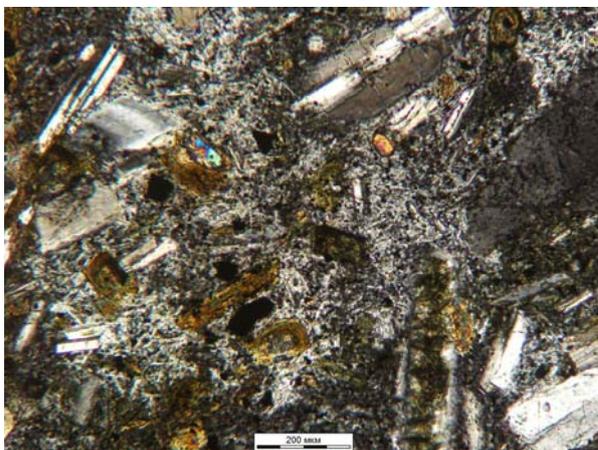


Рис. 1. Цеолитизация основной массы в андезите (n+)

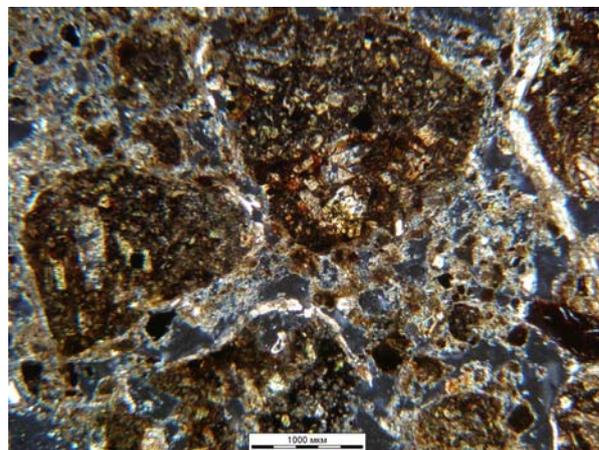


Рис. 2. Метасоматическая брекчия по андезиту (n+)

### Состав и свойства гидротермальных глин

Вверх по разрезу (на глубинах от 1,5 до 5-6 м на разных участках поля) андезиты превращаются в гидротермальные глины, образующие «чехол» в пределах термального поля. Толща глин имеет зональное строение, выражающееся в изменении цвета, консистенции, гранулометрического и минерального составов и свойств отложений.

*Состав и строение толщи гидротермальных глин.* В самой нижней части залегают суглинки тяжелые и легкие, характеризующиеся твердой консистенцией. В их минеральном составе преобладает смектит, в меньших количествах присутствуют кварц, опал, альбит, пирит и другие сульфиды; выделяются прожилки и жеоды кальцита. Содержание каолинита фиксируется в виде следов.

Выше выделяется четкий маломощный горизонт (2,45-2,85 м) темно-серых «сухих» суглинков тяжелых полутвердой консистенции, сложенных в основном каолинитом и смектитом в сопоставимых количествах.

Основной горизонт (0,9-2,45 м) мощностью 1,5 м представлен серыми глинами мягкопластичной до скрытотекучей консистенции. Визуально в нем выделяется большое количество кремнезема (корочек, линз и прожилков опала и кварца) и пирита (рассеянного или образующего жеоды и прожилки, часто мономинеральные). В минеральном составе преобладает хорошо окристаллизованный каолинит, в меньших количествах присутствуют кварц, опал, пирит и реликтовые остатки полевых шпатов.

Переходный слой (0,7-0,9 м) к верхнему горизонту характеризуется тугопластичной консистенцией и выделяется повышенным содержанием крупнокристаллического (до 1,5-2,0 м), относительно равномерно рассеянного пирита.

Глины верхнего горизонта (до 0,7 м) сложены каолинитом и минералами изоморфного ряда алуниит-ярозит, содержат гетит и другие гидроксиды железа, пирит, кварц. Этот горизонт относится к зоне сернокислотного выщелачивания, в которой выделяется слой черно-красных (гематитизированных) глин полутвердой консистенции с унаследованной псевдоморфной структурой блоковой отдельности исходных пород – лав андезитов.

*Свойства гидротермальных глинистых грунтов.* Гидротермальные глинистые грунты характеризуются высокими значениями естественной влажности, которая увеличивается вверх по разрезу от 38-60% в подошве глинистой толще до 84-116% в ее кровле. Плотность грунтов имеет тенденцию к снижению – от 1,65-1,70 г/см<sup>3</sup> до 1,38-1,43 г/см<sup>3</sup>. Пористость при этом изменяется от 39-45% до 75-81%, соответственно. Число пластичности гидротермальных глинистых грунтов принимает значения в диапазоне от 2 до 55 %, консистенция вверх по разрезу меняется от твердой ( $I_L < 0$ ) (на границе с андезитами) до скрытотекучей ( $1,04 < I_L < 3,00$ ) в основном горизонте и в кровле толщи. Максимальная гигроскопическая влажность глин достигает 50-60 %.

Изучение деформационных свойств позволяет классифицировать гидротермальные глинистые грунты как сильносжимаемые по всей толще. Модуль общей деформации глинистых грунтов изменяется от 0,14 до 3,27 МПа. Отмечается, что даже при нагрузках 0,3 МПа в грунте могут сохраняться макропоры и трещины [2].

При одноосном раздавливании практически все образцы гидротермальных глин разрушаются как хрупкопластичные тела, при этом прочность на одноосное сжатие изменяется от 0,05 до 0,14 МПа. Относительно высокой прочностью обладают даже глины, находящиеся в скрыто-текучем состоянии, т.е. те, которые переходят в текучее состояние при нарушении структурных связей. Это можно объяснить присутствием в грунтах структурных связей смешанного типа (фазовых и коагуляционных), обусловленных наличием помимо глинистых минералов, большого количества кремнистых новообразований и реликтовых остатков плагиоклазов. В общем случае, вверх по разрезу отмечается тенденция к снижению прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов.

## **Заключение**

Восточно-Паужетское термальное поле сложено гидротермальными глинами, сформированными за счет перерождения лав андезитов при взаимодействии с газо-гидротермальными флюидами. Исходные андезиты представляют собой плотные, низкопористые, прочные, слабдеформируемые породы. В приповерхностной зоне андезитовый массив неравномерно аргиллизирован; первичные компоненты в различной степени замещены смектитами, цеолитами, опалом, кварцем, кальцитом, пиритом. Верхний горизонт андезитов брекчирован и изменен в наибольшей степени. Гидротермальная переработка андезитов вызывает их разуплотнение и выщелачивание, при этом существенно уменьшаются их упругие и прочностные свойства. Такая тенденция в изменении свойств способствует дальнейшей прогрессирующей аргиллизацией. Вверх по разрезу андезиты превращаются в гидротермальные глины, образующие экранирующий теплоизоляционный «чехол» в пределах термального поля. Толща глин имеет зональное строение, выражающееся в изменении цвета, консистенции, гранулометрического и минерального составов и свойств отложений. В частности, в нижней части глинистого горизонта преобладают смектиты, в верхней – каолинит; консистенция глин последовательно меняется от твердой до скрытотекучей.

В целом, вверх по разрезу термального поля происходит существенное разуплотнение пород, пористость увеличивается на порядок (от 5-7% у исходных андезитов до 75-81% у глин верхнего горизонта), прочность снижается на три порядка (от 85-100 МПа до 0,05-0,14 МПа). В результате замещения первичных компонентов андезитов глинистыми минералами и процесса разуплотнения пород изначально слабдеформируемые породы превращаются в сильносжимаемые. Породы приобретают пластические свойства, становятся гигроскопичными.

Таким образом, в пределах термального поля, под воздействием парогидротерм скальный андезитовый массив превращается в толщу гидротермальных глин – пород с совершенно иными свойствами и инженерно-геологическими особенностями.

Авторы выражают благодарность ст.н.с. Крупской В.В., Закусину С.В., Гараниной С.А. за выполнение минерального анализа исследуемых грунтов методом рентгеновской дифракции при помощи рентгеновского дифрактометра Rigaku ULTIMA-IV. Исследования проведены с использованием оборудования, полученного в рамках реализации Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-05-00708а, 16-05-00501а, 16-05-00971а, 16-05-00007а).

## **Список литературы**

1. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
2. Кузнецов Р.А., Булыгина Л.Г., Чернов М.С. Изменение строения гидротермальных глинистых грунтов при деформировании // Материалы третьего Всероссийского совещания "Глины-2015". Москва: ИГЕМ РАН, 2015. С. 96-97.
3. Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. 208 с.
4. Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В. Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 39-55.
5. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.