

УДК 624.131.43

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-5-46-57

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНДЕЗИТОВ ВОСТОЧНО-ПАУЖЕТСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АРГИЛЛИЗАЦИИ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

Илья Евгеньевич Большаков¹✉, Юлия Владимировна Фролова²,
Сергей Николаевич Рычагов³, Михаил Сергеевич Чернов⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; bolshakov.ilya.210@yandex.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ju_frolova@mail.ru

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; rychn@kscnet.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; miha.chernov@yandex.ru

Аннотация. Исследованы особенности преобразования андезитов Восточно-Паужетского термального поля под действием процесса аргиллизации на ряде образцов различной степени измененности, отобранных из буровых скважин и из обнажений вблизи исследуемого объекта. Выявлены основные закономерности изменения минерального состава и физико-механических свойств андезитов. Составлена принципиальная схема строения термального поля в разрезе, согласно которой снизу вверх выделяются три горизонта, отражающие увеличение степени гидротермального преобразования — измененные андезиты, метасоматические брекчии и гидротермальные глины.

Ключевые слова: аргиллизация, андезит, термальное поле, Камчатка, физико-механические свойства, гидротермальные изменения, вторичные минералы

Для цитирования: Большаков И.Е., Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С. Закономерности изменения состава и физико-механических свойств андезитов Восточно-Паужетского термального поля под действием аргиллизации (Южная Камчатка) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 5. С. 46–57.

PATTERNS OF CHANGES IN THE COMPOSITION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF ANDESITES OF THE EAST PAUZHETSKY THERMAL FIELD UNDER THE INFLUENCE OF ARGILLIZATION (SOUTHERN KAMCHATKA)

Ilya E. Bolshakov¹✉, Yuliya V. Frolova², Sergey N. Rychagov³, Mikhail S. Chernov⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; bolshakov.ilya.210@yandex.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ju_frolova@mail.ru

³ Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; rychn@kscnet.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; miha.chernov@yandex.ru

Abstract. The features of the transformation of andesites of the East-Pauzhetsky thermal field under the influence of the argillization process are studied on a number of samples of various degrees of alteration taken from boreholes and from outcrops near the object under study. The main patterns of changes in composition and physical-mechanical properties of andesites are revealed. A schematic diagram of the structure of the thermal field in the section has been compiled, according to which three horizons are distinguished from bottom to top, showing an increase in the degree of hydrothermal transformation — altered andesites, metasomatic breccias and hydrothermal clays.

Keywords: argillization, andesite, thermal field, Kamchatka, physical and mechanical properties, hydrothermal alteration, secondary minerals

For citation: Bolshakov I.E., Frolova Yu.V., Rychagov S.N., Chernov M.S. Patterns of changes in the composition and physical-mechanical properties of andesites of the East Pauzhetsky thermal field under the influence of argillization (Southern Kamchatka). *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 5: 46–57. (In Russ.).

Введение. С увеличением темпов технологического развития человечество становится все более заинтересовано в использовании нетрадиционных источников тепла и электроэнергии, к числу которых относится геотермальная энергия недр Земли. Мировое сообщество активно ведет изучение гидротермальных систем и связанных с ними месторождений термальных вод и пара. Данные месторождения

служат отличными источниками электрической и тепловой энергии, причем их преимуществом является минимальное негативное воздействие на окружающую среду и возобновляемость. Кроме того, они являются источниками различных полезных ископаемых.

В России наиболее благоприятными регионами с точки зрения использования геотермальной

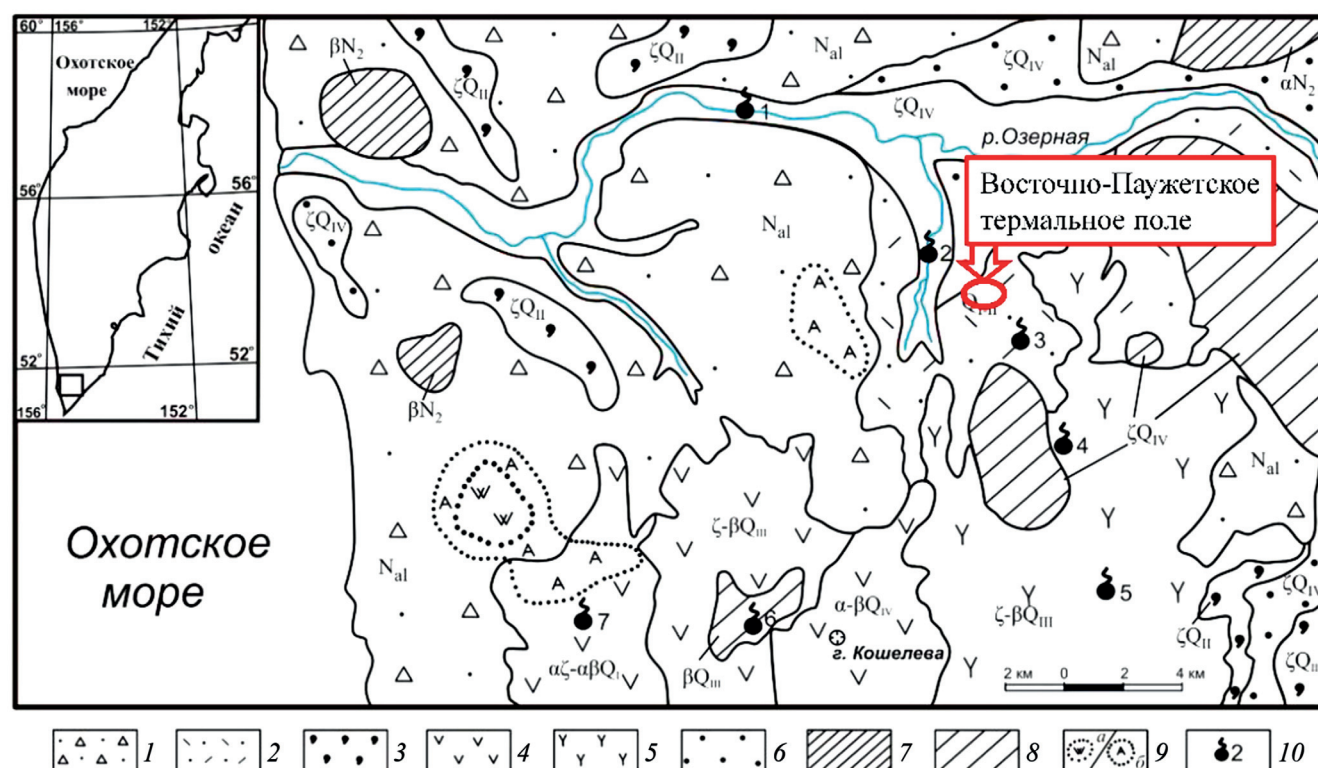


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального (рудного) района Южной Камчатки [по Рычагову и др., 2021]. Составлена на основании обобщения материалов научных исследований и государственных геологических съемок масштаба 1:200 000. На врезке обозначено положение района исследования. 1 — лавопирокластические отложения (Nal, алнейская свита); 2 — вулканогенно-осадочные отложения (QI-II, паужетская свита); 3 — игнимбриты (QII); 4 — магматический комплекс Кошелевского вулканического массива: дациандезиты — андезибазальты западной части ($\alpha\zeta$ - $\alpha\beta$ QI), дациты — базальты центральной части (ζ - β QIII), андезибазальты восточной части (α - β QIV); 5 — лаво-экструзивный комплекс пород (верхняя часть разреза) от дацитов до базальтов Камбального вулканического хребта (ζ - β QIII); 6 — пемзовые отложения дацитов — риолитов (ζ QIV); 7 — субвулканические и экструзивные тела среднего и основного состава (α N2, β N2); 8 — то же, контрастного состава, от базальтов до дацитов (β QIII, ζ - β QIII, ζ QIV); 9 — поля вторичных кварцитов (а) и ариллизитов (б) в районе палеогидротермальной системы «Третья Речка»; 10 — основные геотермальные аномалии и группы термальных полей: 1 — Первые Горячие Ключи (Пионерлагерь), 2 — Вторые Горячие Ключи (Паужетская гидротермальная система), 3 — Северо-Камбальная, 4 — Центрально-Камбальная, 5 — Южно-Камбальная, 6 — Верхне-Кошелевская, 7 — Нижне-Кошелевская

энергии являются Камчатка и Курильские острова — здесь разведаны десятки геотермальных месторождений, построено несколько тепловых и электрических станций, функционируют рекреационные зоны и тепличные хозяйства. Одним из масштабных геологических процессов, происходящих в пределах гидротермальных систем, является переработка горных пород термальными водами, что приводит к изменению их состава и физико-механических свойств. Гидротермально измененные породы представляют интерес для инженерной геологии, поскольку они служат основанием различных сооружений геотермальных станций (зданий, сепараторов, трубопроводов, транспортирующих перегретый пар, дорог и пр.). Следует отметить, что толщии гидротермально измененных пород имеют ряд специфических особенностей, которые, несмотря на наличие некоторого количества отечественных и зарубежных публикаций по данному вопросу [Фролова и др., 2011; Navelot et al., 2018; Siratovich, 2012] до сих пор слабо изучены с инженерно-геологической точки зрения.

Наиболее интенсивные изменения пород происходят в пределах термальных полей, на участках разгрузки гидротерм на поверхности. В связи с этим, целью данной работы являлось выявление закономерностей изменения состава и физико-механических свойств андезитов в пределах одного из термальных полей Паужетского месторождения, хорошо известного с момента запуска первой в СССР геотермальной станции в 1967 г.

Геологическое строение Паужетского геотермального района. Паужетский геотермальный район расположен на южном окончании Восточно-Камчатского вулканического пояса (рис. 1) и был впервые обследован в середине XVIII в. С.П. Крашенинниковым. Он приурочен к Паужетско-Озерновской депрессии, находящейся в пределах долин одноименных рек [Долгоживущий ..., 1980].

Серьезное научное изучение района началось в XX в. с таких работ как [Термальные ..., 1937; Аверьев и др., 1965; Набоко и др., 1965]. Большая разведанная часть месторождения термальных вод находится на северо-западном склоне Камбального

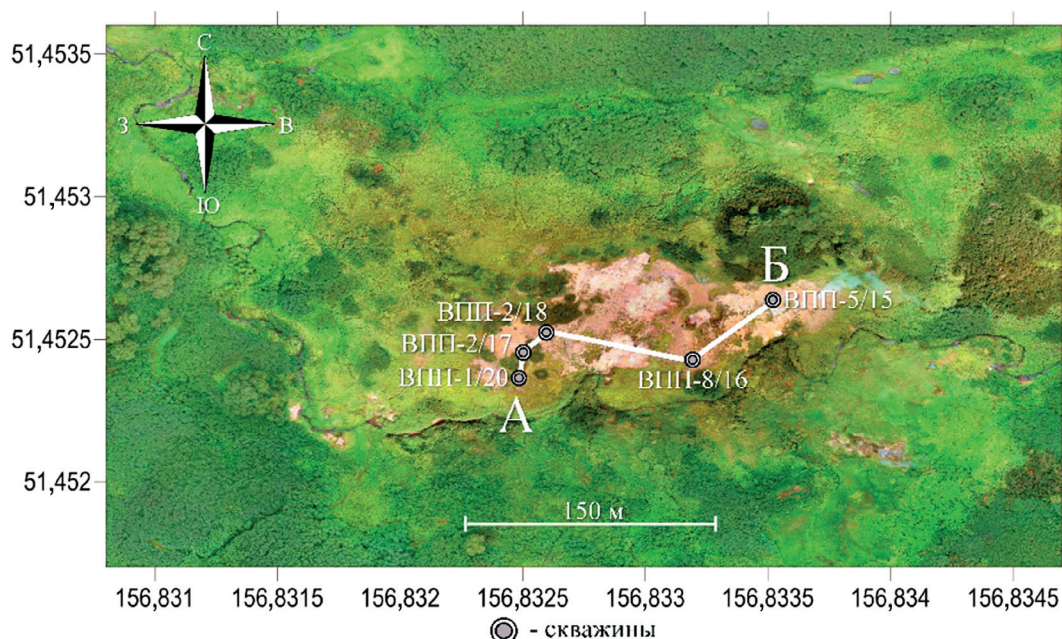


Рис. 2. Ортофотоплан Восточно-Паужетского термального поля с нанесенными скважинами и линией разреза (см. рис. 11)

вулканического хребта, представляющего собой вулканическую структуру, возраст которой не превышает 235 тыс. лет [Давыдова и др., 2022].

В геологическом строении Паужетского района принимают участие породы мелового возраста, не вскрывающиеся на поверхности, и вулканогенные образования мио-плиоценового и четвертичного времени [Структура ..., 1993]. Район в основном сложен осадочно-вулканогенным комплексом пород, причем большая часть территории покрыта эффузивными и пирокластическими образованиями контрастного состава, а осадочные образования, в основном являющиеся продуктами разрушения лавового и туфового материала, занимают пониженные части рельефа [Аверьев, Белоусов, 1965].

Восточно-Паужетское термальное поле. За счет разгрузки глубинного тепла на дневной поверхности в пределах Паужетского месторождения сформировано несколько термальных полей, одним из которых является Восточно-Паужетское поле. Оно расположено на северо-западном склоне Камбального вулканического хребта в восточной оконечности месторождения на высоте около 300 м над уровнем моря [Гидротермальные ..., 1976]. Поле имеет вытянутую в субширотном направлении форму с линейными размерами примерно 350 × 100 м (рис. 2). Приповерхностные термальные воды, разгружающиеся на Восточно-Паужетском поле, представляют собой конденсаты вторичного пара, генетически связанного с глубинными хлоридными натриевыми растворами [Ерощев-Шак, 1992].

В пределах Паужетского месторождения на поверхность выходят преимущественно туфогенные породы паужетской свиты и именно они преобразуются под действием разгружающихся гидротерм. Однако на отдельных участках туфы перекрыты лавовыми потоками андезитового состава. На од-

ном из таких потоков и сформировалось Восточно-Паужетское термальное поле [Рычагов и др., 2012]. Данное поле является крайне интересным объектом для изучения, поскольку, в отличие от других полей, оно расположено на значительном удалении (1–2 км) от основного эксплуатационного участка месторождения и геотермальной станции, в связи с чем условия циркуляции и разгрузки термальных вод и пара можно считать естественными.

Полевые работы на Паужетском месторождении проводились в период с 2016 по 2020 г. и включали в себя бурение скважин с отбором образцов. За это время сотрудникам ИВиС ДВО РАН и МГУ имени М.В. Ломоносова удалось отобрать 55 образцов андезитов различной степени преобразованности — от неизмененных до практически полностью переработанных в метасоматические брекчии и гидротермальные глины. Отбор образцов андезитов производился из скважин, пробуренных колонковым способом на глубину до 8,5 м. Бурение осуществлялось с помощью переносной буровой установки КМБ-2-10. В данной работе были исследованы образцы из 5 скважин, пробуренных непосредственно на термальном поле (ВПП-1/20; ВПП-2/18; ВПП-5/15; ВПП-8/16; ВПП-2/17) (рис. 2), и одной скважины, пробуренной при разведке месторождения на некотором удалении от данного поля (скв. 102).

Помимо этого, был исследован образец неизмененного андезита, отобранный на небольшом удалении от термального поля и образец «пропаренного» андезита, отобранный из активной паровой струи. Все образцы были разделены на 4 группы по степени измененности — неизмененные, слабо-, сильноизмененные андезиты, метасоматические брекчии.

По результатам бурения составлена обобщенная колонка (рис. 3), отражающая принципиальное строение Восточно-Паужетского термального поля,

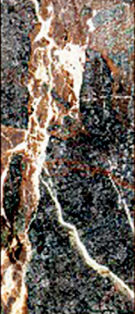
Вскрытая мощность, см	Тип пород	Колонка	Фото образцов	Описание пород
20-120	Гидротермальные глины			Глины зоны сернокислотного выщелачивания. Охристого цвета, полутвердые с включениями сульфатов, лимонита, опала и халцедона.
80-170				Серые монтмориллонитовые глины, от тугопластичной до текучепластичной консистенции с большим количеством пирита и опаловых корочек
60-295				Серые сухие монтмориллонитовые глины, твердой и полутвердой консистенции с редкими обломками андезитов
20-220	Измененные андезиты и метасоматические брекчии			Андезитовые метасоматические брекчии сцементированные вторичными минералами
40-530				Измененные андезиты с большим количеством трещин, прожилков, заполненных вторичными минералами

Рис. 3. Составляющие разреза Восточно-Паужетского термального поля

и выделены основные составляющие разреза (сверху вниз) — гидротермальные глины, метасоматические брекчии и измененные андезиты.

На поверхности и до глубины от 2,5 до 4 м залегают гидротермальные глины, образовавшиеся в результате полной аргиллизации исходных андезитов. В толще глин выделяются несколько горизонтов [Метасоматизм ..., 1998].

Под толщей глин залегают метасоматические андезитовые брекчии с различным соотношением обломков и цемента, который представлен гидротермальными глинистыми минералами, цеолитами и небольшим количеством силикатов и карбонатов. Ниже брекчии переходят в сильноизмененные андезиты, разбитые большим количеством трещин, заполненных вторичными минералами. Мощности всех слоев крайне изменчивы, что связано с большой

неоднородностью проницаемости пород, слагающих термальное поле. Предположительно, ниже по разрезу должны залегать слабоизмененные андезиты, однако такие породы не были вскрыты ни одной из пробуренных на поле скважин.

Методика исследований. В процессе выполнения работы было изучено 55 образцов андезитов различной степени измененности.

Для проведения лабораторных испытаний из всех образцов, отобранных в поле, были приготовлены пробы цилиндрической формы с различным соотношением высоты к диаметру, согласно стандартным методикам.

В процессе выполнения работы были определены (измерены или рассчитаны) следующие показатели физических и физико-механических свойств: плотность воздушно-сухого грунта (ρ), плотность

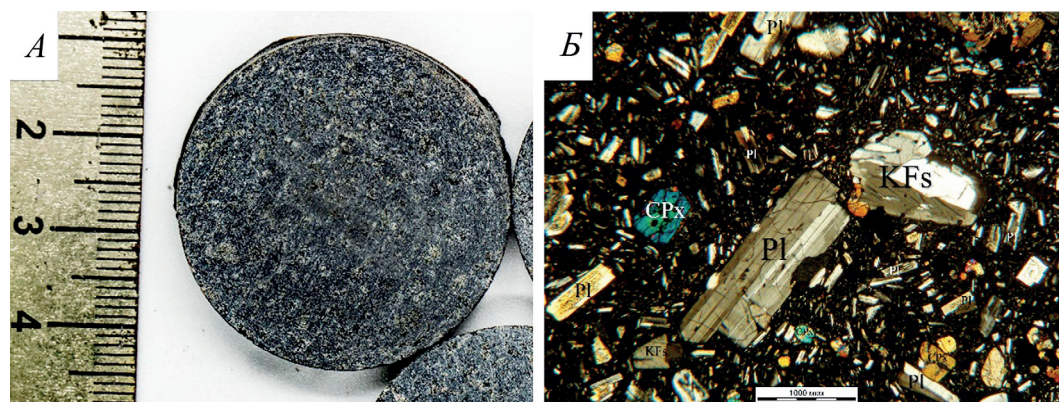


Рис. 4. Неизмененный андезит. А — макрофотография, Б — общий вид в шлифе при скрещенных николях (Pl — плагиоклаз, KFs — калиевый полевой шпат, CPx — клинопироксен)

водонасыщенного грунта ($\rho_{\text{вод}}$), плотность твердых частиц (ρ_s) (прибор В.Я. Калачева ПЭЛа), гигроскопическая влажность (W_g), пористость общая (n) и открытая (n_o), водопоглощение (W_p), магнитная восприимчивость (χ), скорость распространения продольных волн в воздушно-сухом (V_p) и водонасыщенном ($V_{pв}$) состоянии грунта (метод ультразвукового просвечивания, прибор «Ультразвук»), скорость распространения поперечных волн в воздушно-сухом (V_s) и водонасыщенном ($V_{св}$) состоянии, коэффициент Пуассона ($\mu_{\text{дин}}$), динамический модуль упругости ($E_{\text{дин}}$), прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом (R_c) и водонасыщенном ($R_{св}$) состоянии (Пресс ИП-1А-1000 с максимальной нагрузкой 100т), коэффициент размягчаемости ($K_{\text{разм}}$), прочность на одноосное растяжение в воздушно-сухом (R_p) и водонасыщенном состоянии ($R_{пв}$). Все измерения проводились в лабораториях кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по стандартным методикам, соответствующим ГОСТ [Фролова, 2015].

Минеральный состав и структурно-текстурные характеристики пород исследовались в прозрачных шлифах на оптическом поляризационном микроскопе Olympus BX-41. Для более детального изучения минерального состава использовался метод рентгеновской дифрактометрии. Работы выполнены

с использованием рентгеновского дифрактометра ULTIMA-IV, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета им. М.В. Ломоносова (аналитики — вед. инж. С.А. Гаранина, ст.н.с., к.г.-м.н. В.В. Крупская). Проведен количественный минеральный анализ пятнадцати образцов.

Характеристика андезитов и продуктов их гидротермальной переработки. Неизмененные (исходные) андезиты. Для получения наиболее полной картины последовательного изменения андезитов под действием аргиллизации, примерно в 50 м от термального поля был отобран образец, который можно считать неизмененным (рис. 4). Данный образец имеет темно-серый цвет, порфировую структуру и массивную текстуру (рис. 4, А).

Среди минералов-вкрапленников преобладают плагиоклазы (рис. 4, Б), размер зерен которых достигает 1,5 мм. Также присутствуют пироксены и калиевый полевой шпат, каждый из которых занимает около 20% от общего объема вкрапленников. Основная масса породы интерсертально-гиалопилитовая и представлена микролитами вышеперечисленных минералов и вулканическим стеклом. Следы вторичных изменений практически отсутствуют.

Слабоизмененные андезиты. В данную группу были объединены образец «пропаренного» андезита из активной паровой струи и образец андезита из

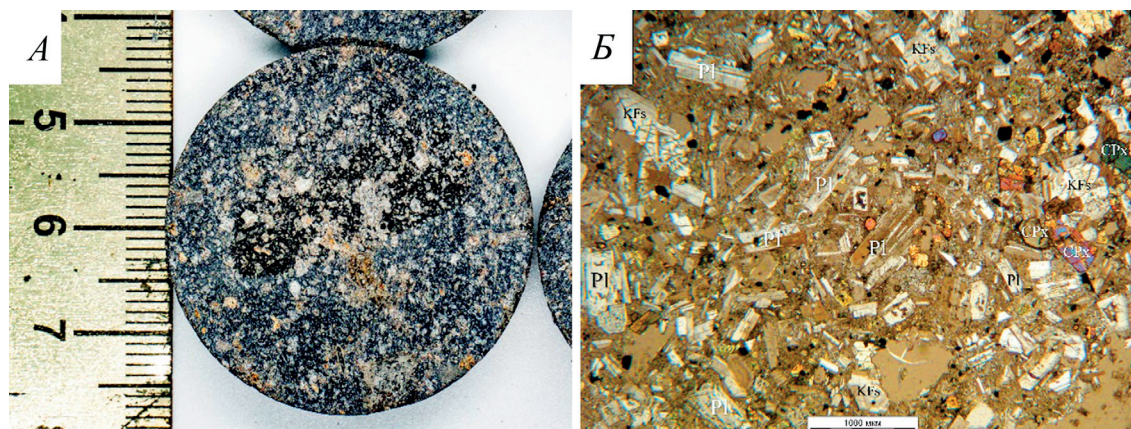


Рис. 5. Слабоизмененный андезит. Обозначения см. рис. 4

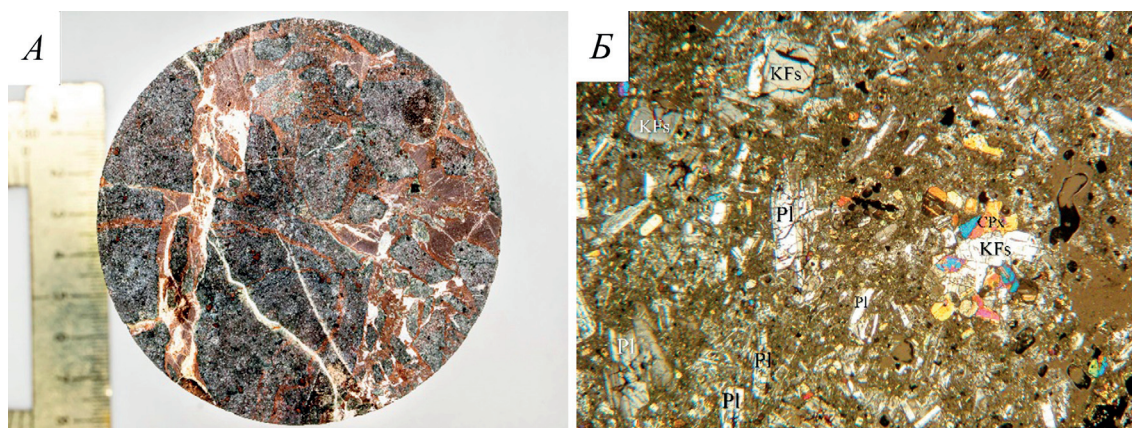


Рис. 6. Сильноизмененный андезит. Обозначения см. рис. 4

скважины 102, пробуренной на склоне Камбального хребта в прошлом столетии.

В окрасе андезитов появляется буроватый оттенок, порфировая структура сохраняется. В порах и трещинах наблюдаются вторичные минералы, в связи с чем текстура превращается в миндалекаменную (рис. 5). Среди минералов вкрапленников преобладают плагиоклазы и до 30% от объема вкрапленников занимают пироксены и полевой шпат. Следует отметить, что в основании Восточно-Паужетского поля слабоизмененные андезиты могут отсутствовать ввиду ограниченной мощности лавового потока, перекрывающего туфы паужетской свиты. Вместе с тем, несомненно, что в ходе эволюции термального поля, андезиты проходили через данную стадию измененности, поэтому изучение этой группы пород необходимо для более глубокого понимания процесса аргиллизации.

Сильноизмененные андезиты (рис. 6) залегают в основании разреза, вскрытого скважинами на термальном поле. Они имеют буровато-серый цвет, порфировую структуру и миндалекаменную текстуру, сильно трещиноваты. Макротрещины мощностью в раздувах до 10–15 мм выполнены, в основном, минералами кремнезема, оксидами железа, карбонатами, цеолитами и пиритом. Микро-трещины прослеживаются за счет окрашивания гидрооксидами железа. Андезиты основания включают

линзы и жёды, выполненные кварц-опал-карбонат-цеолитовым агрегатом; в отдельных случаях фиксируются мономинеральные образования. Размеры линз и жёд достигают 20×50 мм. Скважинами также вскрыты зоны, состоящие полностью из вторичных минералов (фрагменты андезитов отсутствуют), мощностью до 15–20 см. Состав сложный и включает перечисленные выше вторичные минералы, а также оксиды железа; на стенках каверн образуются крупные кристаллы пирита; зеленая окраска фрагментов обусловлена развитием смектитов и, вероятно, хлорит-смектитов.

Вторичные изменения в андезитах данной группы активно развиваются по зернам минералов-вкрапленников. Основная масса и трещины во вкрапленниках чаще всего замещаются на глинистые минералы и минералы группы цеолитов. В крупных трещинах заметно развитие множества других минералов, например, кальцита, кварца, гипса, опала и др. (рис. 6).

Метасоматические брекчии. Выше по разрезу возрастает степень трещиноватости андезитов и они распадаются на обломки, превращаясь в метасоматические брекчии. Фрагменты андезитов преимущественно изометричные, со сглаженными краями, состоят из более мелких фрагментов, часто смещенных относительно друг друга (рис. 7). Размер обломков варьирует от 2 мм до 3 см и более. Они

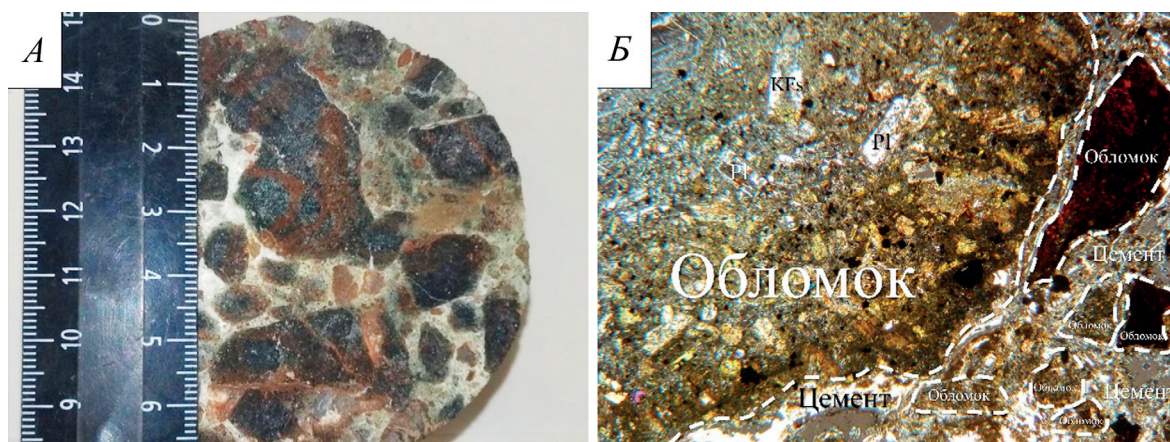


Рис. 7. Метасоматическая брекчия. Обозначения см. рис. 4

Таблица 1

Минеральный состав измененных андезитов и продуктов их гидротермальной переработки
(по данным рентгеновской дифрактометрии)

Состав пробы	Содержание минералов, %												
	Плаги- оклазы (альбит- анортит)	Пироксе- ны (авгит, ферроси- лит)	КППШ (микро- клин-ор- токлаз)	Кварц	Кальцит	Цеолиты		Гипс	Пирит	Гематит	Иллит	Смектит	Каолинит
						Клино- птилолит, гейландит	Стиль- бит						
Цемент метасоматической брекчии	3,1	7,0	12,5	10,8	5,7	6,6	16,6	0,8	2,0	0,4	0,4	31,5	3,1
Метасоматическая брекчия	11,9	4,7	12,5	16,5	3,7	10,7	4,3	0,7	0,2	0,9	1,2	29,5	2,7
Сильноизмененный андезит	24,4	5,9	13,3	13,5	2,2	4,4	1,0	0,5	0,1	1,4	1,3	28,0	4,0
Вторичные минералы из трещин сильноизмененного андезита	0,7	0,5	0,9	1,2	42,1	1,6	31,3	0,5	7,9	0	0,5	12,3	0,8

в значительной степени изменены, причем степень изменения заметно увеличивается от центральных частей к периферии. Обломки скреплены полиминеральным цементом, представленным ассоциацией вторичных минералов: смектиты + хлориты + кварц + опал + карбонаты + цеолиты + сульфиды.

Согласно господствующей гипотезе, метасоматические брекчии образуются путем переработки и замещения исходных андезитов вторичными минералами, сопровождающихся их растрескиванием, постепенным разрастанием трещин вплоть до распада исходной породы на отдельные обломки, которые скрепляются новообразованным метасоматическим цементом в результате действия фрагментарного метасоматоза [Царев, 1984; Рычагов и др., 20196].

Стоит отметить, что мощность метасоматических брекчий различна в различных частях поля и соответственно в скважинах, варьируя от 20–40 см до 2–3 м и более.

Гидротермальные глины образуют сплошной покров, мощностью от 1,5 до 7 м, на поверхности термального поля. В его пределах выделяется ряд различных слоев, количество которых можно при определенном обобщении сократить до трех (рис. 3). Строение глинистой толщи Восточно-Паужетского термального поля подробно рассмотрено в ряде работ [Рычагов и др., 2019а; Кузнецов и др., 2015 и др.].

Результаты исследования и их обсуждение. Осредненные результаты исследований минерального состава андезитов и метасоматических брекчий, слагающих основание термального поля представлены в табл. 1, где показано, что с увеличением степени преобразования андезитов уменьшается содержание плагиоклаза и возрастает количество вторичных минералов, в первую очередь, цеолитов и кальцита. Среди глинистых минералов преобладают смектиты, причем их содержание в измененных андезитах и метасоматических брекчиях примерно одинаково.

По результатам рентгеновской дифрактометрии и анализу микростроения в шлифах выявлена последовательность гидротермальных преобразований андезитов. Вторичные изменения сначала затрагивают вулканическое стекло, постепенно полностью

преобразовывая его. Далее происходит замещение наиболее неустойчивых минералов, которое начинается по периферии кристаллов, а также по трещинам, разбивающим минералы-вкрапленники. В сильноизмененных андезитах практически все плагиоклазы и пироксены частично, а некоторые и полностью, замещены вторичными минералами (рис. 6). В конечном итоге, андезиты распадаются на фрагменты и превращаются в метасоматические брекчии с полиминеральным цементом, в составе которого преобладают глинистые минералы, цеолиты, кварц и кальцит (рис. 7).

Структурно-минералогические преобразования андезитов в ходе гидротермальной переработки вызывают закономерное изменение их свойств. Осредненные значения показателей физических и физико-механических свойств андезитов приведены в табл. 2.

Для большинства исследованных параметров отчетливо видна взаимосвязь между степенью изменения породы и величиной показателя свойств.

Плотность андезитов закономерно снижается с увеличением степени измененности (рис. 8, А), поскольку плотность новообразований существенно ниже, по сравнению с первичными минералами, а кроме того, формируется вторичная пористость. Также увеличивается разброс ее значений, что связано с неоднородностью сильноизмененных пород, обусловленной полиминеральным составом, сильной трещиноватостью и брекчированностью.

Плотность твердых частиц для всех четырех групп образцов практически не отличается. Это объясняется тем, что, с одной стороны, более плотное вулканическое стекло и первичные минералы андезитов замещаются менее плотными глинистыми минералами и цеолитами, но в то же время происходит новообразование достаточно тяжелых минералов, например, пирита и гематита.

Пористость андезитов имеет четкую зависимость от степени вторичной измененности (рис. 8, Б). Увеличение пористости связано с активным выщелачиванием андезитов термальными водами в процессе аргиллизации. Можно утверждать, что

Таблица 2

Показатели физических и физико-механических свойств андезитов различной степени измененности

Степень изменения	Количество проб	Значения	ρ	ρ_s	n	W_n	n_o	V_p	V_s	μ , дин	E , дин	R_c	R_p	χ
			г/см ³	г/см ³	%	%	%	км/с	км/с	д.е.	ГПа	МПа	МПа	СИ* 10 ⁻³
Неизмененные	9	Среднее	2,71	2,78	2,6	0,3	0,9	5,6	3,0	0,30	62,67	142,3	21,4	31,1
		Минимальное	2,68	2,78	1,5	0,3	0,8	5,3	2,7	0,24	51,22	129,7	20,3	30,0
		Максимальное	2,74		3,5	0,4	1,0	6,1	3,2	0,34	69,65	154,4	22,4	32,3
Слабоизмененные	10	Среднее	2,62	2,79	6,0	1,0	2,7	4,1	2,0	0,34	30,28	114,2	8,5	26,3
		Минимальное	2,55	2,79	2,7	0,9	2,4	2,8	1,4	0,25	15,09	87,0	5,3	19,9
		Максимальное	2,70		8,5	1,2	3,1	5,5	2,7	0,39	52,91	155,0	12,6	42,3
Сильноизмененные	34	Среднее	2,48	2,81	11,4	1,3	2,5	3,9	2,1	0,31	27,96	42,53	4,73	25,8
		Минимальное	2,31	2,61	3,8	0,6	1,0	2,5	1,4	0,21	12,49	19,7	2,1	12,6
		Максимальное	2,71	2,99	22,8	2,9	3,7	4,9	2,6	0,39	46,49	69,8	11,4	38,8
Метасоматические брекчии	28	Среднее	2,28	2,80	18,1	4,2	9,3	3,0	1,6	0,27	17,01	20,65	2,72	18,8
		Минимальное	1,75	2,57	8,2	2,5	5,3	1,2	0,8	0,13	3,14	2,3	0,7	2,3
		Максимальное	2,47	2,98	32,3	5,7	12,2	4,4	2,4	0,38	35,38	50,3	4,0	31,6

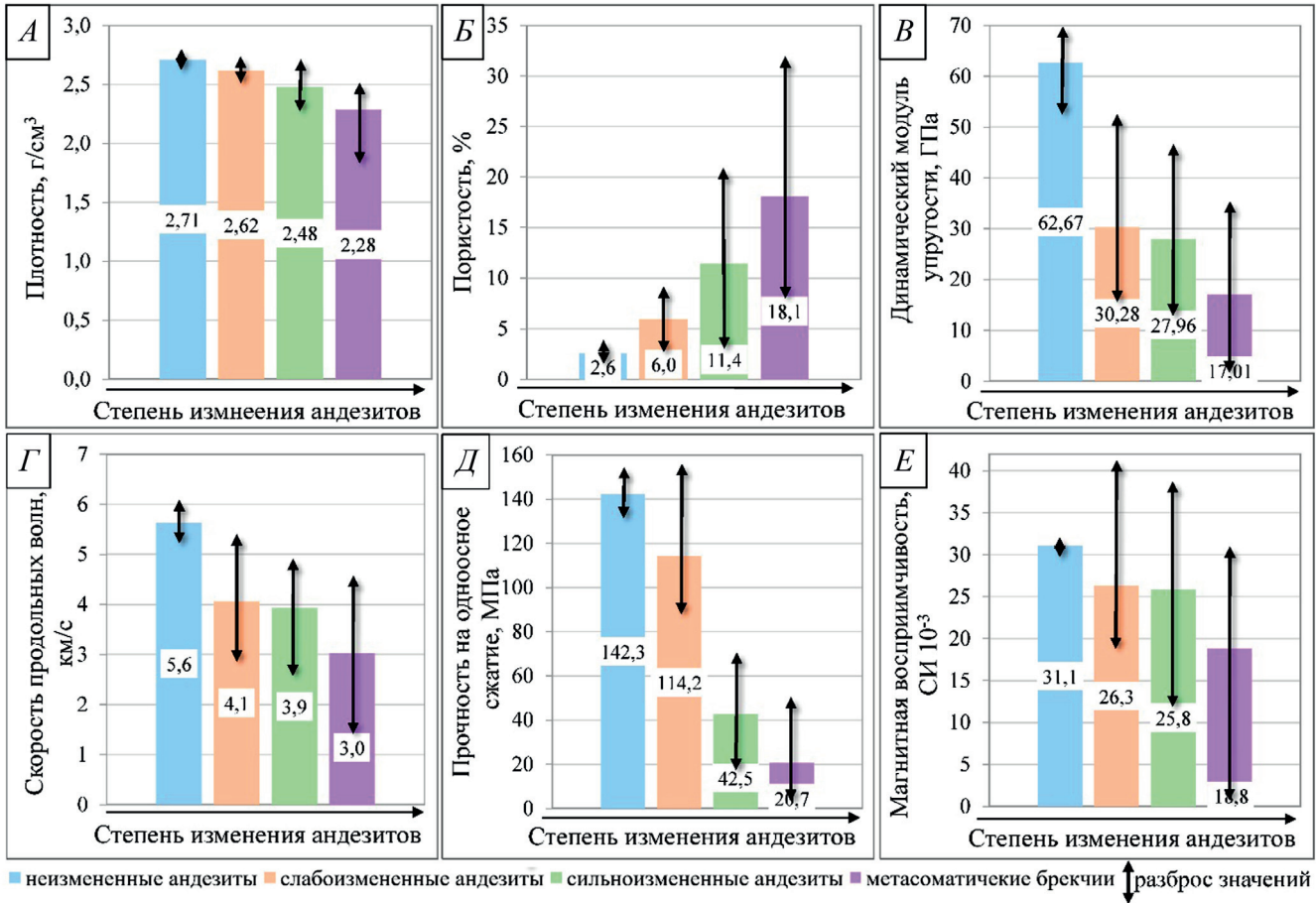


Рис. 8. Диаграммы изменения показателей свойств андезитов в зависимости от степени их изменения: А — плотность; Б — пористость; В — скорость распространения продольных волн; Г — динамический модуль упругости; Д — прочность на одноосное сжатие; Е — магнитная восприимчивость

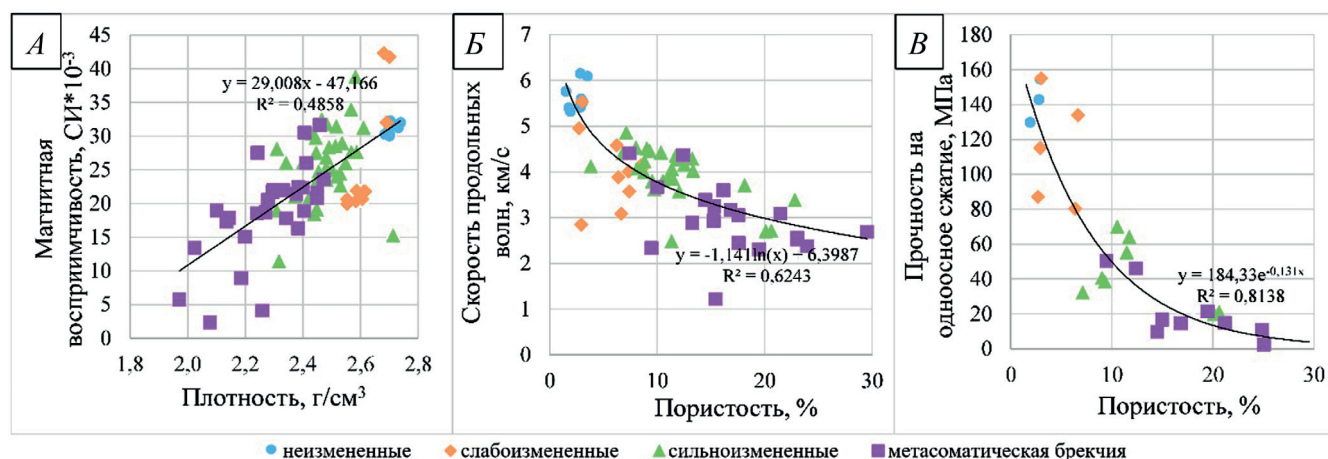


Рис. 9. Взаимосвязи различных показателей свойств андезитов: А — магнитной восприимчивости и плотности; Б — прочности на одноосное сжатие и пористости; В — скорости распространения продольных волн и пористости

именно изменение величины пористости, наравне с изменениями в минеральном составе, оказывает максимальное влияние как на физические, так и физико-механические свойства андезитов (рис. 9, Б, В).

Аналогичная тенденция изменения характерна для величины водопоглощения и открытой пористости, что также связано с образованием вторичных минералов (глинистых и минералов группы цеолитов) и одновременным выщелачиванием исходных андезитов.

Скорости распространения продольных и поперечных волн как в воздушно-сухом, так и водонасыщенном состоянии равномерно уменьшаются с увеличением степени измененности пород. В воздушно-сухом состоянии показатели уменьшаются практически в два раза при переходе от неизменных андезитов к метасоматическим брекчиям (рис. 8, Г). Это обусловлено увеличением пористости, развитием вторичной трещиноватости, формированием менее плотных метасоматических минералов.

Динамический модуль упругости определялся расчетным способом через скорости упругих волн и плотность, поэтому для него характерен аналогичный тренд на уменьшение с увеличением степени изменения андезитов (рис. 8, В).

Прочность в воздушно-сухом состоянии как при испытаниях в условиях одноосного сжатия, так и на разрыв, изменяется аналогично многим рассмотренным показателям, то есть снижается с увеличением степени изменения андезитов (рис. 8, Д). В первую очередь, это связано с увеличением трещиноватости породы и формированием менее прочных вторичных минералов.

Следует отметить, что выделенным группам присущи различные типы разрушения под нагрузкой. Так, образцы неизменных и слабоизмененных андезитов, а также некоторых брекчий (наиболее измененных) в условиях одноосного сжатия обнаруживали «классическое» столбчатое или коническое разрушение. В то же время образцы сильноизме-

ненных андезитов в основном разрушались по существующим в породе трещинам, а большая часть метасоматических брекчий распадалась на блоки по контактам обломок-цемент. При испытаниях на разрыв образцы метасоматических брекчий в основном разрушались по контактам обломков, а андезиты, вне зависимости от степени изменения, на два полуцилиндра.

Магнитная восприимчивость закономерно уменьшается при увеличении степени изменения (рис. 8, Е). Высокие значения χ в исходных породах обусловлены наличием в их составе ферромагнитных (титаномагнетит) и парамагнитных (авгит, роговая обманка) минералов. Снижение магнитной восприимчивости в два раза с увеличением степени изменения породы связано с замещением первичных магнитных минералов на менее магнитные вторичные (кварц, глинистые минералы, цеолиты и др.). Следует отметить большой разброс значений χ у измененных андезитов, связанный, по-видимому, с пространственной неоднородностью переработки отдельных фрагментов пород.

Корреляционные зависимости между различными показателями свойств. Обнаружены тесные корреляционные зависимости между различными показателями свойств. Так, на рис. 9, А показана взаимосвязь показателей плотности и магнитной восприимчивости, которая объясняется тем фактом, что ферромагнитные и парамагнитные минералы обычно обладают повышенными значениями плотности. Однако величина магнитной восприимчивости у образцов даже в пределах одного лавового потока может заметно отличаться и этот разброс лишь усиливается за счет неравномерного в пространственном отношении процесса аргиллизации.

На рис. 9, Б и В приведены графики зависимости показателей упругих и прочностных свойств андезитов от их пористости с учетом степени гидротермального изменения. При повышении пористости от 2–3 до 25–30%, происходящем в ходе метасомати-

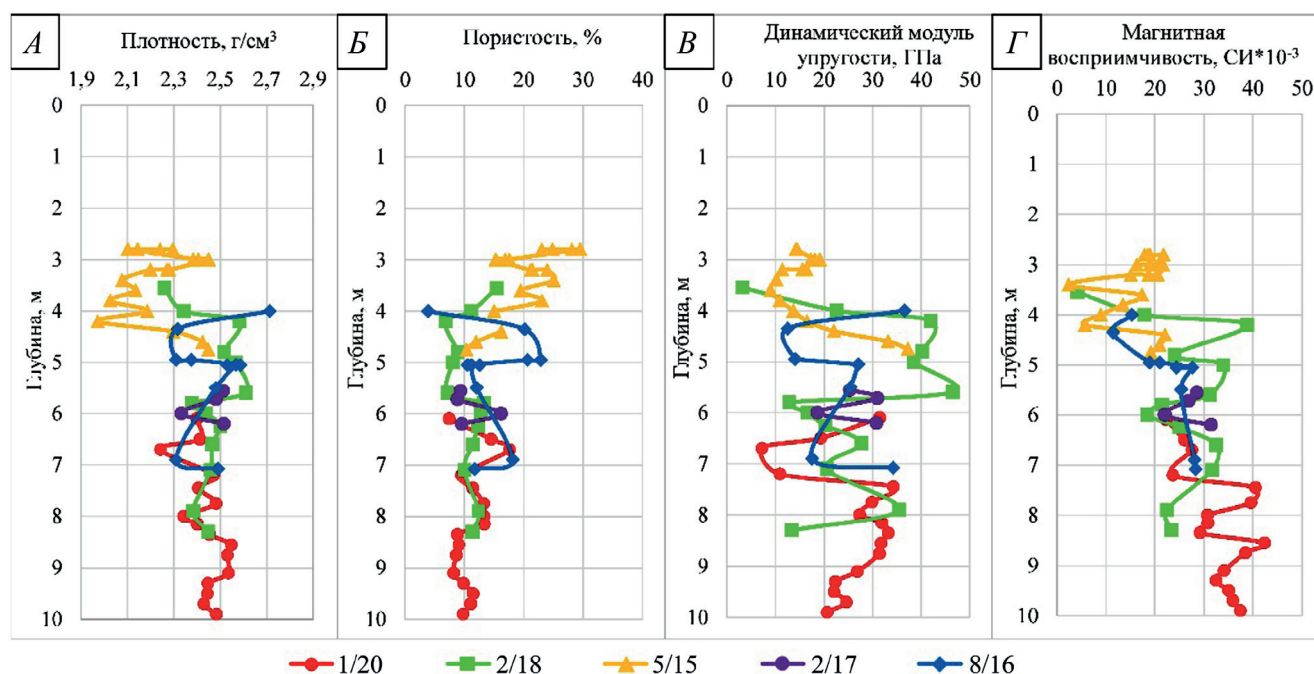


Рис. 10. Изменение показателей свойств с глубиной в различных скважинах на термальном поле: А — плотность; Б — пористость; В — динамический модуль упругости; Г — магнитная восприимчивость

ческих преобразований, прочность R_c снижается на порядок, а скорость распространения продольных волн уменьшается в 2–3 раза.

Изменение свойств по разрезу термального поля. На рис. 10 показана тенденция изменения свойств пород с глубиной для пяти скважин, пробуренных в пределах термального поля. На графиках для всех рассматриваемых свойств (плотность, пористость, динамический модуль упругости и магнитная восприимчивость) можно наблюдать достаточно хаотичную картину: изменение показателей свойств не однородно по глубине. Особенно большой разброс значений наблюдается в верхних горизонтах, представленных наиболее измененными породами. Это связано с тем, что основную роль в изменении андезитов термального поля играет проницаемость толщи, а сеть трещин, по которым могут циркулировать термальная вода и пар, крайне неоднородна. Однако, эти графики позволяют сделать вывод, что с увеличением глубины (примерно с 6 м) разброс в значениях показателей свойств андезитов снижается, то есть массив становится более однородным.

По результатам бурения и лабораторных исследований свойств составлен схематический геологический разрез (рис. 11) с вынесенными показателями свойств пород, определенных по керну пяти скважин. Стоит отметить, что разделение толщи на сильноизмененные андезиты и метасоматические брекчии представляет определенную сложность, так как однозначная граница между ними отсутствует. Кроме того, в связи с ограничениями в размере отобранных образцов (кern диаметром 7,3 см или меньше) большую роль играет масштабный эффект. Например, некоторые образцы метасоматических брекчий на 90% по объему представлены одним

большим обломком андезита. В этом случае свойства образца будет правильнее относить к свойствам сильноизмененного андезита, хотя фактически это образец метасоматической брекчии. Этот же масштабный эффект во многом объясняет значительные колебания в свойствах даже соседних образцов, так как распределение обломков в метасоматических брекчиях и трещин в сильноизмененных андезитах носит случайных характер.

На разрез вдоль каждой из скважин, представляющих собой ось глубины, вынесены показатели плотности, магнитной восприимчивости и динамического модуля упругости (рис. 11). Наблюдается, во-первых, неоднородность распределения свойств по глубине для одной и той же группы пород, во-вторых, невыдержанность мощности метасоматических брекчий в пределах термального поля. Также, на данном рисунке видна определенная взаимосвязь между показателями различных свойств в одной скважине. Так, в скважине ВПП-8/16 наиболее отчетливо видно, что все три приведенные показателя свойств имеют практически одинаковый характер изменения. Аналогичная тенденция наблюдается в скважинах ВПП-2/17, ВПП-2/18 и ВПП-1/20. В скважине ВПП-1/18 подобная картина также прослеживается, но в менее явной форме, за счет более хаотичного распределения свойств по глубине в метасоматических брекчиях, связанного с их неоднородностью. Однако, несмотря на значительную хаотичность распределения показателей свойств пород по глубине, в скважинах, в которых представлены как метасоматические брекчии, так и сильноизмененные андезиты, замечена тенденция общего повышения значений физических и физико-механических свойств.

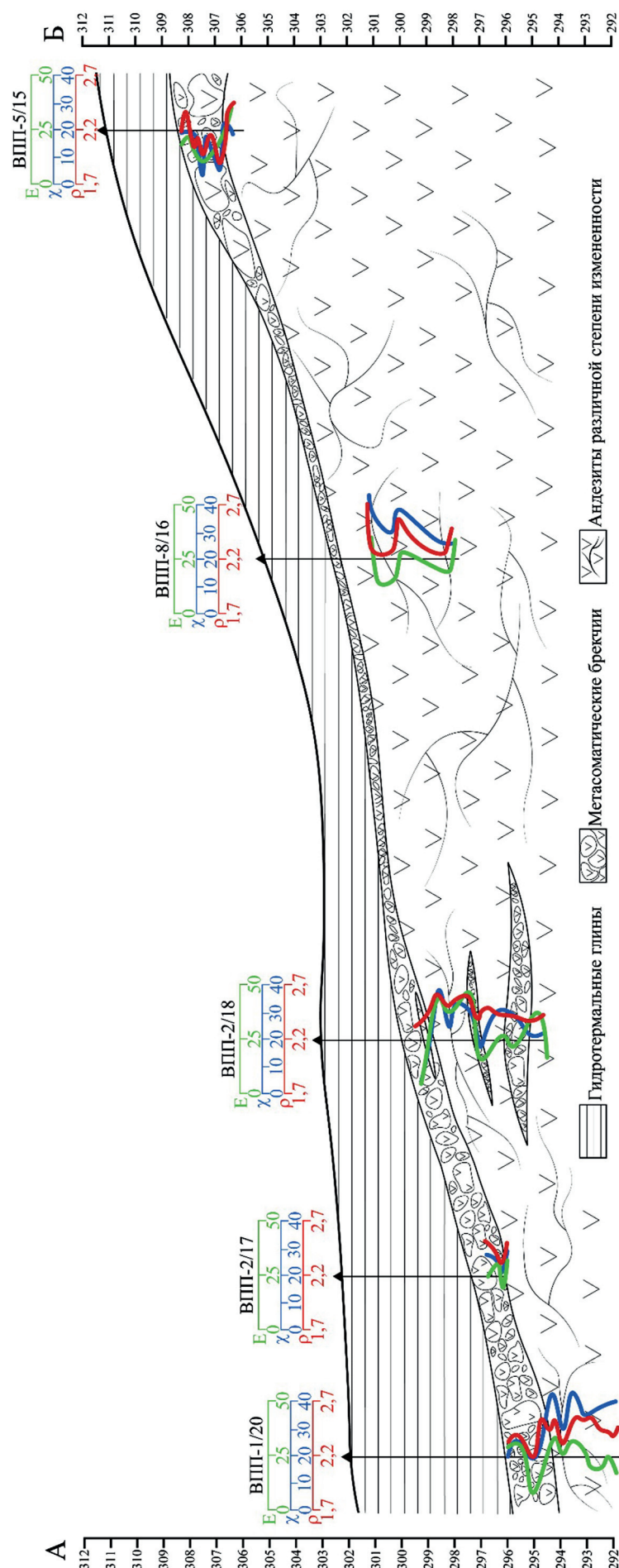


Рис. 11. Схематический разрез Восточно-Паужетского термального поля с вынесенными показателями динамического модуля деформации (Е, ГПа), магнитной восприимчивости ($\chi \cdot 10^{-3}$ СИ) и плотности (ρ , г/см³)

Заключение. Восточно-Паужетское термальное поле сформировалось на андезитах, которые при активизации гидротермальной деятельности и разгрузке гидротерм начали изменяться. В первую очередь было переработано вулканическое стекло, а затем вторичные изменения начали развиваться по минералам-вкрапленникам.

В разрезе термального поля, до глубины 7–8 м, выделяются три горизонта (снизу вверх): трещиноватые измененные андезиты, андезитовые метасоматические брекчии и гидротермальные глины. Максимальная преобразованность пород достигается в приповерхностных условиях и выражается в полном изменении минерального состава исходных пород и превращении их в гидротермальные глины. Ниже породы представляют собой метасоматические брекчии, в которых встречаются участки, максимально приближенные к глинам (с отсутствием обломков).

В ходе гидротермальных преобразований минеральный состав изменился с классического для андезитов (вулканическое стекло, вкрапленники и микролиты плагиоклазов, пироксенов, амфиболов и КППШ) на смектиты, цеолиты, кварц, кальцит и пирит.

Степень изменения пород сильно зависит от их пространственного положения в определенной части поля и глубины залегания. Основным фактором, контролирующим процесс гидротермального изменения, по-видимому, является проницаемость толщи пород.

Структурно-минералогические преобразования андезитов в ходе гидротермальной переработки изменяют их физические и физико-механические свойства. При увеличении степени изменения андезитов происходит их разуплотнение, уменьшаются скорость распространения продольных и поперечных волн, динамический модуль упругости, прочность на одноосное сжатие и разрыв. Данные характеристики снижаются вследствие увеличения пористости и формирования менее плотных и прочных вторичных минералов, содержание которых

может превышать 60%. На снижение прочности также большое влияние оказывают изменения структуры породы, увеличение неоднородности и трещиноватости.

Несмотря на гидротермальную переработку и практически полное изменение состава исходных андезитов, для всех групп образцов присутствует тесная корреляция между показателями физических и физико-механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьев В. В., Белоусов В. И. Геологический очерк района // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965.
2. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки / АН СССР, Дальневост. науч. центр, Ин-т вулканологии; Отв. ред. В.М. Сугробов. Владивосток: ДВНЦ, 1976. 283 с.
3. Давыдова В.О., Биндеман И.Н., Щеклеина М.Д., Рычагов С.Н. Паужетская кальдера (Южная Камчатка): Изучение временной эволюции и происхождения объемного кислого магматизма // Петрология. 2022. Т. 30, № 5. С. 480–497.
4. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Отв. ред. Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1980. 172 с.
5. Ероцев-Шак В.А. Гидротермальный субповерхностный литогенез Курило-Камчатского региона. М.: Наука, 1992. 132 с.
6. Кузнецов Р.А., Булыгина Л.Г., Чернов М.С. Изменение строения гидротермальных глинистых грунтов при деформировании // Материалы третьего Всероссийского совещания «Глины-2015». М.: ИГЕМ РАН, 2015. С. 96–97.
7. Метасоматизм и метасоматические породы / Под ред. В.А. Жарикова, В.Л. Русинова. М.: Научный мир, 1998. 492 с.
8. Набоко С.И., Карпов Г.А., Розникова А.П. Гидротермальный метаморфизм пород и минералообразование // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. С. 76–118.
9. Пийп Б.И. Термальные ключи Камчатки / Акад. наук СССР, совет по изучению производительных сил (СОПС); Отв. ред. проф. А. Н. Заварницкий. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1937. 265 с.
10. Рычагов С.Н., Кравченко О.В., Нуждаев А.А., Чернов М.С. Литология толщи глин Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019а. С. 213–216.
11. Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Чернов М.С. и др. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. С. 45–60.
12. Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Чернов М.С., Сергеева А.В. Новые данные о формировании щелочной минерализации в основании толщи глин Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019б. С. 217–220.
13. Рычагов С.Н., Соколов В.Н., Чернов М.С. Гидротермальные глины геотермальных полей Южной Камчатки: новый подход и результаты исследований // Геохимия, 2012. № 4. С. 378–392.
14. Структура гидротермальной системы / С.Н. Рычагов, Н.С. Жатнуев, А.Д. Коробов и др. / Отв. ред. В.И. Белоусов, И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 298 с.
15. Фролова Ю.В. Скальные грунты и лабораторные методы их изучения. М.: КДУ, 2015. 220 с.
16. Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов // Инженерная геология. 2011. № 1. С. 48–64.
17. Царев Д.И. Фрагментарный метасоматоз // Метасоматизм и рудообразование. М.: Наука, 1984. С. 309–320.
18. Navelot V., Géraud Y., Favier A., et al. Petrophysical properties of volcanic rocks and impacts of hydrothermal alteration in the Guadeloupe Archipelago (West Indies) // J. Volcan. and Geothermal Res. 2018. Vol. 360. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.07.004>
19. Siratovich P., Davidson J., Villeneuve M., et al. Physical and mechanical properties of the Rotokawa andesite from production wells RK 27_L2, RK 28 and RK 30 // Proceedings New Zealand Geothermal Workshop. 19–21 November 2012 Auckland, New Zealand. URL: <https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=8019178>

Статья поступила в редакцию 02.05.2023,
одобрена после рецензирования 12.06.2023,
принята к публикации 22.09.2023