

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНДЕЗИТОВ ОКОЛО ТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА (БОЛЬШЕБАННЫЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ РАЙОН, ПОЛУОСТРОВ КАМЧАТКА)

THE CHANGES OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF ANDESITES AROUND THERMAL SPRING (BOLSHEBANNY GEOTHERMAL REGION, KAMCHATKA PENINSULA)

ФРОЛОВА Ю.В.

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, ju_frolova@mail.ru

МОСИН А.М.

Студент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

FROLOVA Yu.V.

Associate Professor of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, ju_frolova@mail.ru

MOSIN A.M.

Undergraduate student of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Ключевые слова:

андезит; термальные воды; вторичные минералы; плотность; пористость; физико-механические свойства; Большебанная гидротермальная система.

Keywords:

andesite; thermal waters; secondary minerals; density; porosity; physical-mechanical properties; Bolshebanny hydrothermal system.

Аннотация

Исследованы структурно-минералогические преобразования и динамика изменения физико-механических свойств андезитов Большебанной гидротермальной системы при их взаимодействии с термальными водами. Показано, что около термального источника андезиты претерпевают существенные изменения минерального состава, заключающиеся в альбитизации плагиоклазов, образовании глинистых минералов (смектитов, смешанослойных хлорит-смектитов) и микрокристаллического кварца по первичным компонентам и в порах. Происходит разуплотнение пород, меняется структура порового пространства — формируются новые поры, образуется сеть микротрещин, что приводит к существенному снижению значений прочностных и деформационных свойств андезитов. По степени изменения пород вокруг термального источника выделены три зоны.

Abstract

The paper describes structural-mineralogical alterations and changes of the physical-mechanical properties of andesites at Bolshebanny hydrothermal system under the action of thermal water. It reveals that around the thermal spring the andesites change their mineral composition such as albitisation of plagioclase, formation of clay minerals (smectites and mixed-layered chlorite-smectite) and microcrystalline quartz by primary minerals and in pores. The rocks are re-compacted, and the structure of pore-space had changed — new pores and microfractures network were formed, that led to the remarkable decrease of strength and deformation properties of andesites. Three zones are distinguished around the thermal spring by intensity of alteration.

Введение

Развитие геотермальной энергетики и использование тепла Земли для целей тепло- и электрификации предполагает изучение инженерно-геологических условий геотермальных районов, включая оценку физико-механических свойств слагающих их пород. Как правило, вулканические породы отличаются достаточно высокими прочностными и деформационными показателями свойств, однако термальные воды могут оказывать на них негативное воздействие, при определенных условиях приводя к существенному их снижению. В свою очередь, изменение свойств пород может иметь целый ряд последствий при освоении и эксплуатации геотермального месторождения. К возможным последствиям можно отнести активизацию обвалово-оползневых процессов [4, 15, 17, 18], гидротермальные взрывы [16], миграцию поверхностных термопроявлений, изменение термогидродинамического режима, деформацию и осадку поверхности при извлечении термальных вод [14], снижение продуктивности скважин [12]. Особенности гидротермального преобразования пород могут повлиять на выбор месторасположения сооружений геотермальных станций, их конструкцию и проч. Под действием гидротермальных процессов скальный вулканический массив может превратиться в глинистую толщу [11], что вносит свои коррективы в методику изучения пород, расчеты устойчивости оснований инженерных сооружений, моделирование и прогноз опасных склоновых процессов.

Одной из задач комплексных экспедиционных работ, проводимых летом 2015 г. в Ягоднинско-Банно-Карымшинском районе полуострова Камчатка сотруд-

никами и студентами геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова совместно с лабораторией геотермии Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, являлось исследование преобразований вулканических пород под действием термальных вод и оценка изменения их свойств.

В настоящей работе приводится характеристика андезитов неогенового возраста, имеющих широкое распространение в районе Большебанных источников, и анализируется изменение их состава и свойств при взаимодействии с водами термального источника. Данные исследования продолжают цикл работ, проводимых авторами на различных гидротермальных системах Курило-Камчатского региона [10, 13].

Геологические и геотермические условия

Большебанная гидротермальная система расположена в 65–70 км к западу-юго-западу от г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1). Район сложен вулканогенными отложениями неогенового и четвертичного возраста. Породы отличаются большим разнообразием. Среди них встречаются базальты, андезиты, дациты, липариты, кислые туфы, игнимбриты. Поверхностные термопроявления гидротермальной системы — Большебанные источники, одна из наиболее крупных и известных групп термальных источников на Камчатке. Они расположены у северного подножия вулканического массива сопки Горячей, преимущественно на левом берегу р. Банной. Горячие источники прослеживаются вдоль реки на протяжении примерно 1,5 км (общая площадь около 0,5 км²). Их выходы есть в пойме, на террасах и у самого уреза воды. Температура воды в источниках колеблется от 20–30°C до 90–99°C. По химическому составу воды сульфатно-хлоридно-натриевые с минерализацией от 0,5 до 1,2–1,4 г/л [6]. По газовому составу воды относятся к азотно-углекислому типу.

Первое упоминание о Большебанных источниках датируется началом XVIII в. Впоследствии они изучались С.П. Крашенинниковым (1737 г.), Б.И. Пийпом (1934 г.), В.В. Ивановым (1950–1952 гг.). В период с 1961 по 1969 г. в данном районе проводились геолого-разведочные работы, в результате которых термопроявления долины р. Банной были рассмотрены с позиций единой гидротермальной системы [5, 8]. Показано, что большую роль в строении термального поля Большебанного геотермального месторождения играют разрывные нарушения северо-западного направления, пересекающие долину р. Банной и существенно перераспределяющие поток термальных вод и пара, поступающий с глубины [7]. В результате на поверхности формируется термальная площадка, вытянутая вдоль линии разлома северо-западного простирания.

В настоящее время интерес геологов к Большебанной гидротермальной системе возобновился в первую очередь в связи с развитием туризма в данном районе.

Фактический материал

В районе Большебанных источников потоки андезитов эпизодически прослеживаются в бортах долины р. Банной, где они нередко подвергаются воздействию

термальных вод. Неизменные андезиты имеют темно-серый цвет, порфировую структуру, массивную текстуру. Порфиновые вкрапленники представлены плагиоклазами (размер 1–3 мм, содержание 5–10%) и пироксенами (размер 1–2 мм, 5%). Основная масса породы — скрытокристаллическая. Хотя андезиты претерпели изменения под воздействием регионального низкоградного метаморфизма и для них типичны такие вторичные минералы, как хлорит и кальцит, мы условно называем их неизменными. Имеется в виду тот факт, что андезиты не подвергались локальным гидротермальным преобразованиям.

На левом берегу р. Банной, в основании террасового уступа, примерно в 30 см над урезом воды наблюдается кипящий источник ($T = 99–100^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6,3$). Вокруг источника андезиты заметно изменены, причем по степени изменения выделяются три зоны (рис. 2, а, б).

Зона 1. В зоне слабого изменения (на расстоянии 1,5–2 м от термального источника) андезиты сохраняют темно-серый цвет, массивную текстуру и порфировую структуру. Изменения заключаются в образовании по поверхности трещин, наблюдаемых в массиве, яркого, буровато-красного налета (вероятно, гематита). Породы не нагреты, однако температура в трещинах достигает 45°C .

Зона 2. Ближе к источнику степень преобразования андезитов увеличивается (T пород $35–39^\circ\text{C}$). Это выражается в изменении цвета пород с темно-серого до серо-зеленого и серо-голубого. По внешней поверхности массива и по трещинам наблюдается ожелезнение в виде желтовато-коричневых пленок лимонита; также по трещинам наблюдаются налеты белого цвета. Порфировая структура пород сохраняется. Трещиноватость массива возрастает, и при небольшом механическом воздействии он распадается на крупный

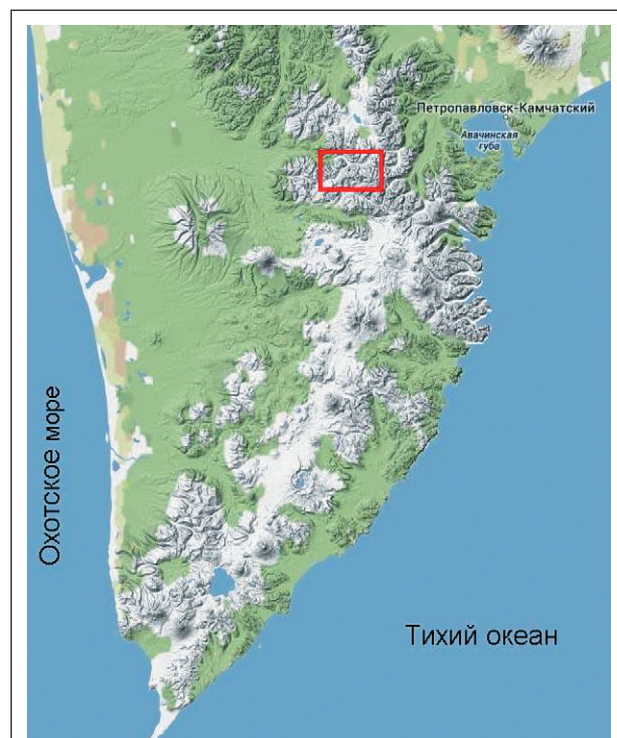


Рис. 1. Месторасположение Большебанной гидротермальной системы

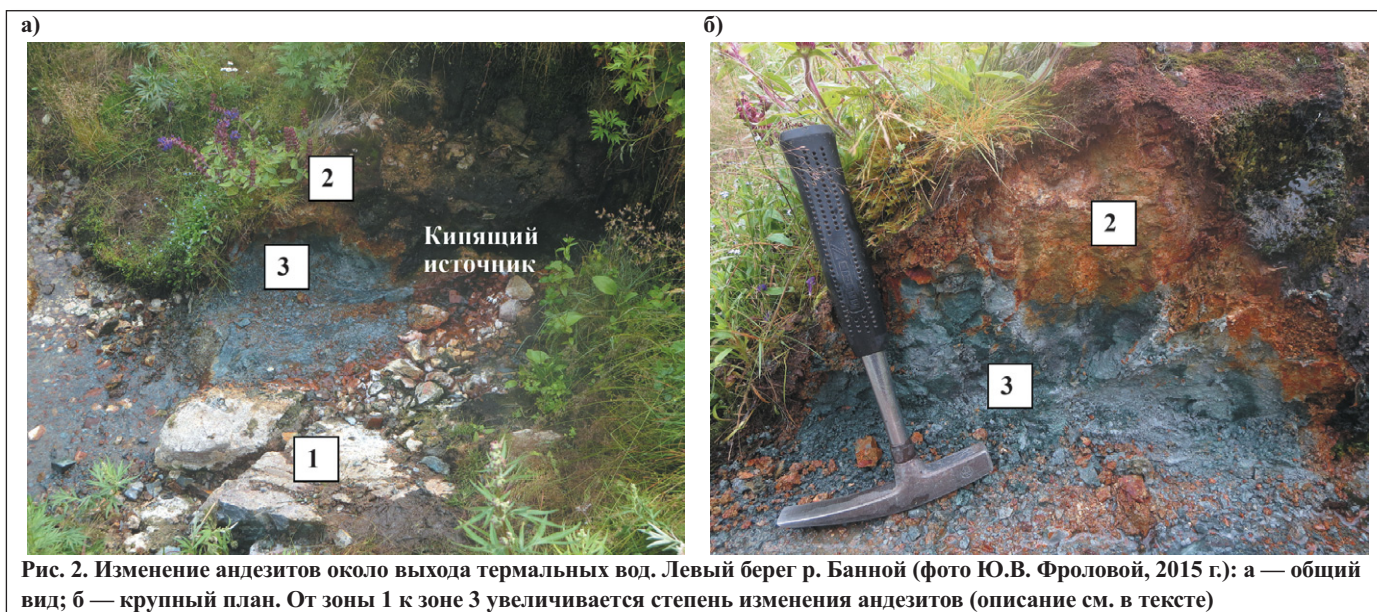


Рис. 2. Изменение андезитов около выхода термальных вод. Левый берег р. Банной (фото Ю.В. Фроловой, 2015 г.): а — общий вид; б — крупный план. От зоны 1 к зоне 3 увеличивается степень изменения андезитов (описание см. в тексте)

щебень размером 10–15 см. Щебень легко раскалывается молотком.

Зона 3. В зоне наиболее интенсивного изменения (Т пород 54–62°C), образованной вокруг источника, породы приобретают голубовато-серый цвет. Здесь андезитовый слой практически распадается на щебень размером 3–5 см. Граница с верхним слоем неровная, с карманами и затеками по трещинам.

Методы исследования

Для исследования особенностей преобразований андезитов при взаимодействии с термальными водами было отобрано 6 образцов, различных по степени изменения. Из каждого образца было подготовлено по 3–4 пробы цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру 1:1. В ходе лабораторных испытаний

Таблица 1

Химический состав плагиоклазов (по данным микрозондового анализа, %)								
Форма выделения	Na	Al	Si	K	Ca	Fe	Ba	Сумма
<i>Исходный андезит</i>								
Фенокристалл	5,16	28,33	54,2	0,37	10,81	0,51	0	99,38
Фенокристалл	5,06	28,54	53,88	0,29	11,07	0,58	0,11	99,53
Фенокристалл	5,41	27,7	54,58	0,29	10,4	0,53	0,1	99
Фенокристалл	4,27	29,86	52,08	0,21	12,64	0,6	0,11	99,76
Микролит	7,08	25,46	58,6	0,52	7,55	0,97	0,14	100,31
Микролит	6,43	26,18	56,82	0,53	8,43	0,86	0,11	99,34
<i>I зона</i>								
Фенокристалл	5,3	27,84	53,97	0,34	10,63	0,54	0	98,6
Фенокристалл	4,76	28,69	52,69	0,29	11,6	0,59	0	98,61
Фенокристалл	4,83	28,65	52,97	0,27	11,37	0,58	0	98,68
Фенокристалл	4,96	28,58	53,7	0,3	11,1	0,58	0,14	99,36
Микролит	6,99	25,13	58,49	0,72	7,06	0,83	0,2	99,41
<i>II зона</i>								
Фенокристалл	11,19	20,61	67,44	0,28	0,85	0,12	0	100,49
Фенокристалл	11,24	20,4	67,07	0,07	1,12	0	0	99,91
Фенокристалл	11,19	20,36	66,56	0,06	1,02	0	0	99,18
Микролит	11,33	20,99	68,09	0,14	0,99	0,1	0	101,64

определялись следующие свойства пород: плотность (ρ), плотность твердых частиц (ρ_s), пористость общая (n) и открытая (n_o), величина водопоглощения (W), гигроскопическая влажность (W_g), магнитная восприимчивость (χ), скорость распространения продольных волн (V_p) в сухом и водонасыщенном состоянии, скорость распространения поперечных волн (V_s), динамический модуль упругости (E_d), прочность на одноосное сжатие (R_c), коэффициент размягчаемости ($K_{разм}$), прочность на разрыв (R_p). Все определения проводились по стандартным методикам [1–3, 9]. Одновременно с определением свойств были изучены состав и структура пород. Все образцы описаны макроскопически и в шлифах (оптический микроскоп «Olympus-VX41»). Минеральный состав определен на дифрактометре «ДРОН-3» (аналитик В.Л. Косоруков). Четыре образца исследованы с помощью растрового электронного микроскопа с микрозондовой приставкой «Jeol JSM-6430» (аналитик Н.Н. Коротяева).

Структурно-минералогические преобразования андезитов около термального источника

Как уже было упомянуто выше, андезиты вокруг термального источника претерпевают заметные преобразования, выражающиеся в изменении цвета и механического состояния. Ниже приводится их микроскопическое описание, начиная от неизменного андезита, отобранного вне зоны влияния термального источника, и заканчивая наиболее переработанным образцом.

Неизменные андезиты (обр. № БН-5/15-3) имеют порфировую структуру, содержание вкрапленников достигает 25–30%. Среди вкрапленников преобладают плагиоклазы (80–90%), в меньшем количестве присутствуют пироксены (5–10%) и рудные минералы (5–10%). Плагиоклаз представлен удлиненными призматическими зернами лабрадора (длина 0,25–0,3 мм, до 1,8 мм; ширина в среднем 0,02–0,4 мм) (рис. 3, а, табл. 1). Пироксены образуют зерна таблитчатой формы размером 0,1–0,5 мм (рис. 3, б). Встречаются как клино-, так и ортопироксены. В некоторых вкрапленниках (как плагиоклазов, так и пироксенов) наблюдаются микротрещины, заполненные кальцитом и хлоритом (рис. 3, а, б). Рудный минерал представлен титаномagnetитом, образующим изометричные зерна до 0,5 мм (рис. 3, в).

Поскольку данный образец был отобран за пределами термального поля, то мы предполагаем, что обнаруженные вторичные минералы (кальцит, хлорит) не связаны с современной гидротермальной деятельностью, а являются следствием региональных низкотемпературных метаморфических процессов.

Зона 1 — слабого изменения (обр. № БН-5/15-2, 2а). Первичные компоненты породы практически не несут следов изменения, за исключением вулканического стекла, по которому местами развиваются вторичные глинистые минералы. Плагиоклазы (как вкрапленники, так и микролиты) (см. табл. 1) и пироксены по своему химическому составу идентичны тем, что были в исходном андезите. Однако можно заметить, что кристаллы более трещиноваты, в них присутствуют следы выщелачивания, грани становятся менее четкими. При

больших увеличениях в трещинах идентифицируются глинистые минералы, кальцит, хлорит (рис. 4, а–в). Содержание глинистых минералов по данным рентгенофазового анализа достигает 13%.

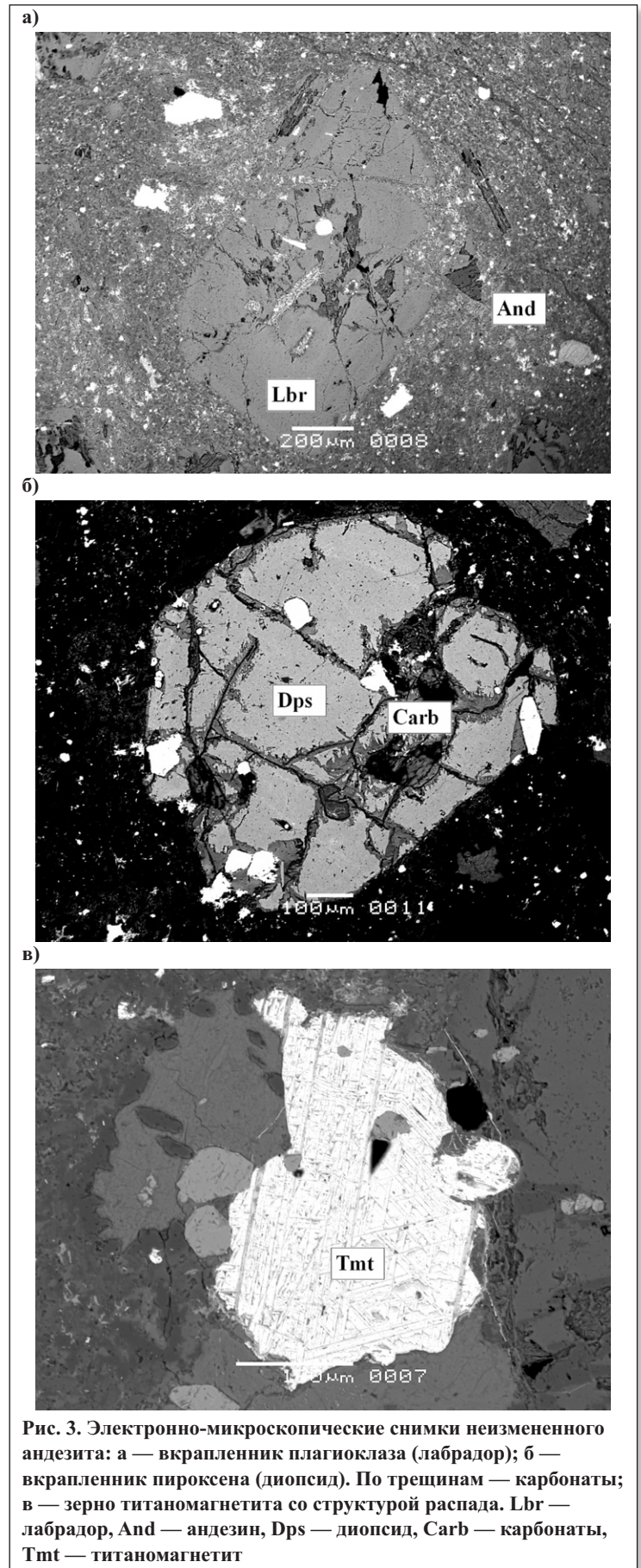


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки неизменного андезита: а — вкрапленник плагиоклаза (лабрадор); б — вкрапленник пироксена (диопсид). По трещинам — карбонаты; в — зерно титаномagnetита со структурой распада. Lbr — лабрадор, And — андезин, Dps — диопсид, Carb — карбонаты, Tmt — титаномagnetит

Рудные минералы представлены титаномагнетитом, как и в исходных андезитах (рис. 4, *г*).

Зона 2 — интенсивного изменения (обр. № БН-5/15-1). Минеральный состав породы заметно меняется. Вкрапленники плагиоклаза альбитизированы (см. табл. 1), также по ним развиты псевдоморфозы глинистых минералов, причем наиболее сильным изменениям подвержены центральные части зерен. Форма кристаллов в целом сохраняется, однако их контуры часто размыты (рис. 5, *а*). По пироксенам образуются псевдоморфозы хлорита и смектита, в трещинах — карбонаты. Состав рудных минералов претерпевает изменения: титаномагнетит частично разлагается с образованием ильменита и рутила, встречаются изометричные зерна пирита (рис. 5, *б*).

Большинство пор в горной породе заполнено вторичными глинистыми минералами — хлоритом и/или смектитами. Внутренняя граница пор выполнена микрозернистым вторичным кварцем с зернами размером в первые микроны (рис. 5, *в*). Вторичный кварц наблюдается также в небольших прожилках и запол-

няет трещины во вкрапленниках плагиоклаза. Зерна кварца ксеноморфны, имеют размер около 0,05 мкм.

Основная масса, изначально состоящая из вулканического стекла и микролитов плагиоклаза, полностью изменена: микролиты альбитизированы (см. табл. 1), а вулканическое стекло перекристаллизовано в смектиты и микрокристаллический кварц.

Следует отметить, что детальное изучение шлифов с помощью оптического микроскопа затруднено из-за большого числа тонкодисперсных минералов. По данным рентгенофазового анализа среди глинистых минералов встречаются гидрослюда, смектиты и хлорит. Их содержание составляет 21%.

Зона 3 — наиболее интенсивного изменения (№ БН-5/15-16). Очертания первичных зерен прослеживаются с трудом. Наблюдается полная альбитизация всех плагиоклазов, как фенокристаллов, так и микролитов основной массы. Также по ним развиваются глинистые минералы в ассоциации с кварцем и калиевым полевым шпатом. Хлорит образует псевдоморфозы по ромбическим пироксенам. Среди вторичных минералов также присутствуют карбонаты.

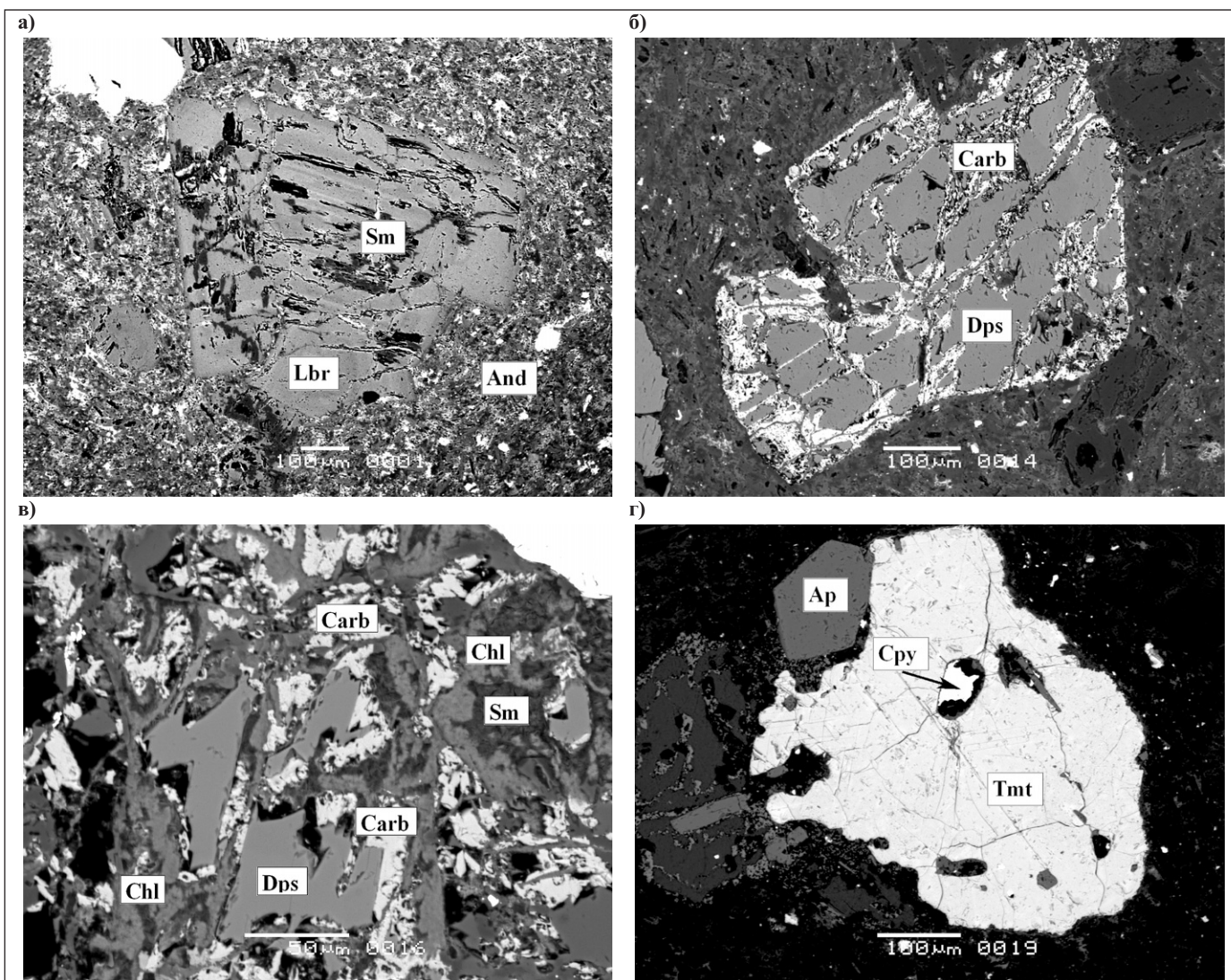


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки андезита в зоне слабого изменения (зона 1): а — трещиноватый вкрапленник плагиоклаза (лабрадор) и микролиты в основной массе; б — вкрапленник пироксена (диопсид), общий план. По трещинам карбонаты, хлорит и смектиты; в — то же, крупный план; г — зерно титаномагнетита с халькопиритом и апатитом. Lbr — лабрадор, And — андезин, Dps — диопсид, Carb — карбонаты, Tmt — титаномагнетит, Sm — смектиты, Chl — хлорит, Ap — апатит, Cpy — халькопирит

Набор рудных минералов в целом остается прежним (реликтовый титаномагнетит, ильменит, рутил, пирит), однако меняется количественное соотношение минералов. Доминирует пирит, зерна которого образуют целые скопления (рис. 6, а).

Матрикс породы сложен микрокристаллическим альбитом и кварцем, в межкристаллическом пространстве развиваются смектиты (рис. 6). Для породы характерна микротрещиноватость, причем трещины открытые. Наблюдаются две генерации трещин — относительно прямолинейные, длиной 1–2 мм (рис. 6, б) и извилистые межкристаллические, длиной 0,02–0,1 мм (рис. 6, в). Этим объясняется тот факт, что образцы из данной зоны легко распадаются на мелкий щебень и дресву. Как и в предыдущей зоне, наблюдаются поры вытянутой формы, часто объединенные в цепочки (рис. 6, з). Поры выполнены смектитами и микрокристаллическим кварцем.

Содержание глинистых минералов увеличивается до 23%. Детальное изучение глинистой фракции (<0,0002 мм) показало, что в ее составе преобладают Mg-смектиты (74%), в меньшем количестве присутствуют магнезиальный хлорит (15%) и неупорядоченные смешанослойные минералы хлорит-смектитового ряда (11%). Вероятно, что под влиянием термальных вод хлорит, являющийся продуктом регионального низкоградного метаморфизма, постепенно трансформируется в смектиты.

Изменение физико-механических свойств андезитов

В процессе гидротермальных преобразований андезитов существенно меняются их физические и физико-механические свойства, причем в динамике их изменения наблюдается ряд закономерностей (рис. 7).

Плотность неизменных андезитов составляет 2,62 г/см³. В первой зоне она не изменяется, и это вполне закономерно, так как здесь практически не происходит минеральных или структурных преобразований породы. Далее, по мере приближения к термальному источнику, наблюдается постепенное разуплотнение пород — во второй зоне плотность уменьшается до 2,30 г/см³, а в третьей — до 2,06 г/см³ (рис. 7, а). Снижение плотности связано, во-первых, с выщелачиванием породы и образованием вторичной пористости и микротрещиноватости, что хорошо наблюдается в шлифах и на снимках РЭМ; во-вторых, с замещением плотного вулканического стекла и плагиоклазов глинистыми минералами с пористой микротекстурой.

Пористость андезитов аналогично плотности в первой зоне не изменяется и составляет 2%. Во второй зоне она повышается до 13%, в третьей — до 24% (рис. 7, б). Таким образом, термальные воды, воздействуя на породы, способствуют выносу первичных компонентов и приводят к разуплотнению.

Аналогично плотности изменяются упругие свойства пород: модуль упругости E_d 48 — 48 — 26 — 20 ГПа (рис. 7, в), V_p — 5,0 — 4,95 — 3,7 — 3,5 км/с (рис. 7, з), то есть в первой зоне значения показателей свойств практически не меняются, а во второй и третьей заметно снижаются. Тенденция изменения прочности на одноосное сжатие несколько отличается

(рис. 7, д). Неизменные андезиты имеют наибольшую прочность ($R_c=176$ МПа), но уже в первой зоне она снижается на 20% (до 142 МПа), а далее, при

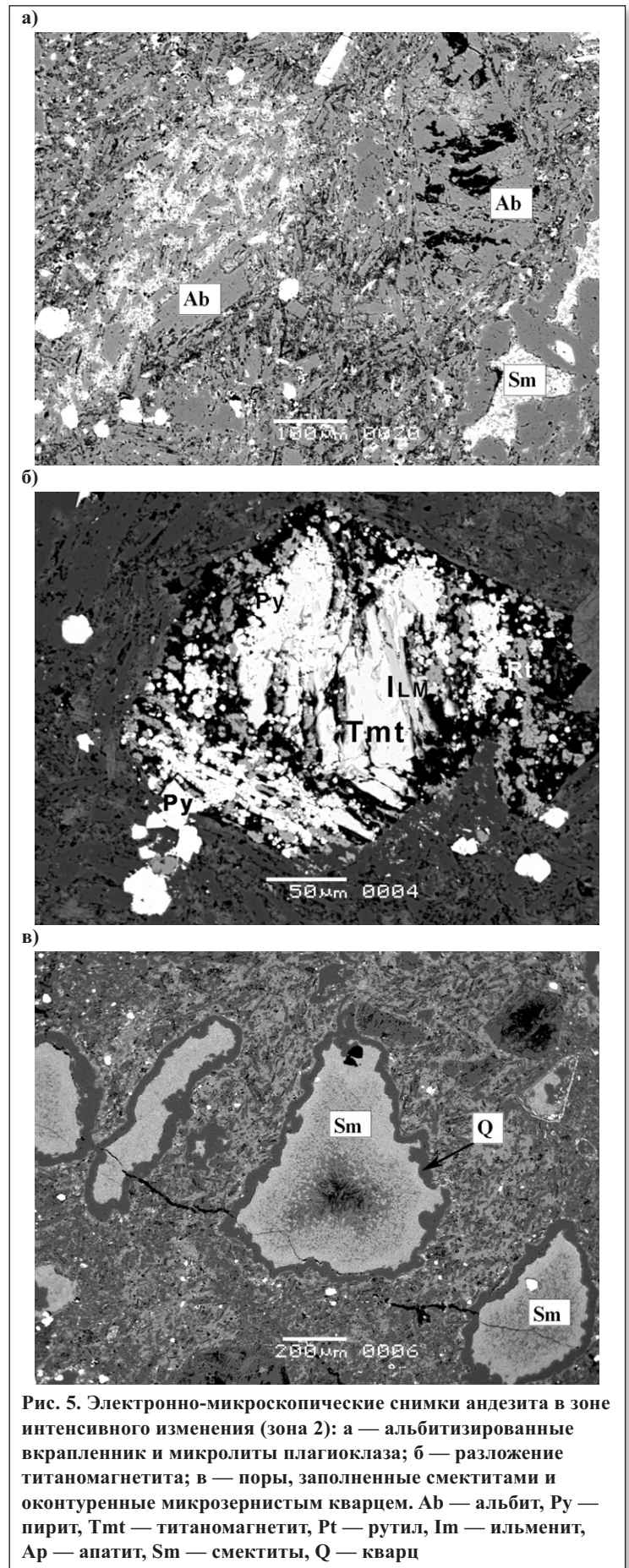


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки андезита в зоне интенсивного изменения (зона 2): а — альбитизированные вкрапленник и микролиты плагиоклаза; б — разложение титаномагнетита; в — поры, заполненные смектитами и околнуренные микрозернистым кварцем. Ab — альбит, Py — пирит, Tmt — титаномагнетит, Pt — рутил, Im — ильменит, Ap — апатит, Sm — смектиты, Q — кварц

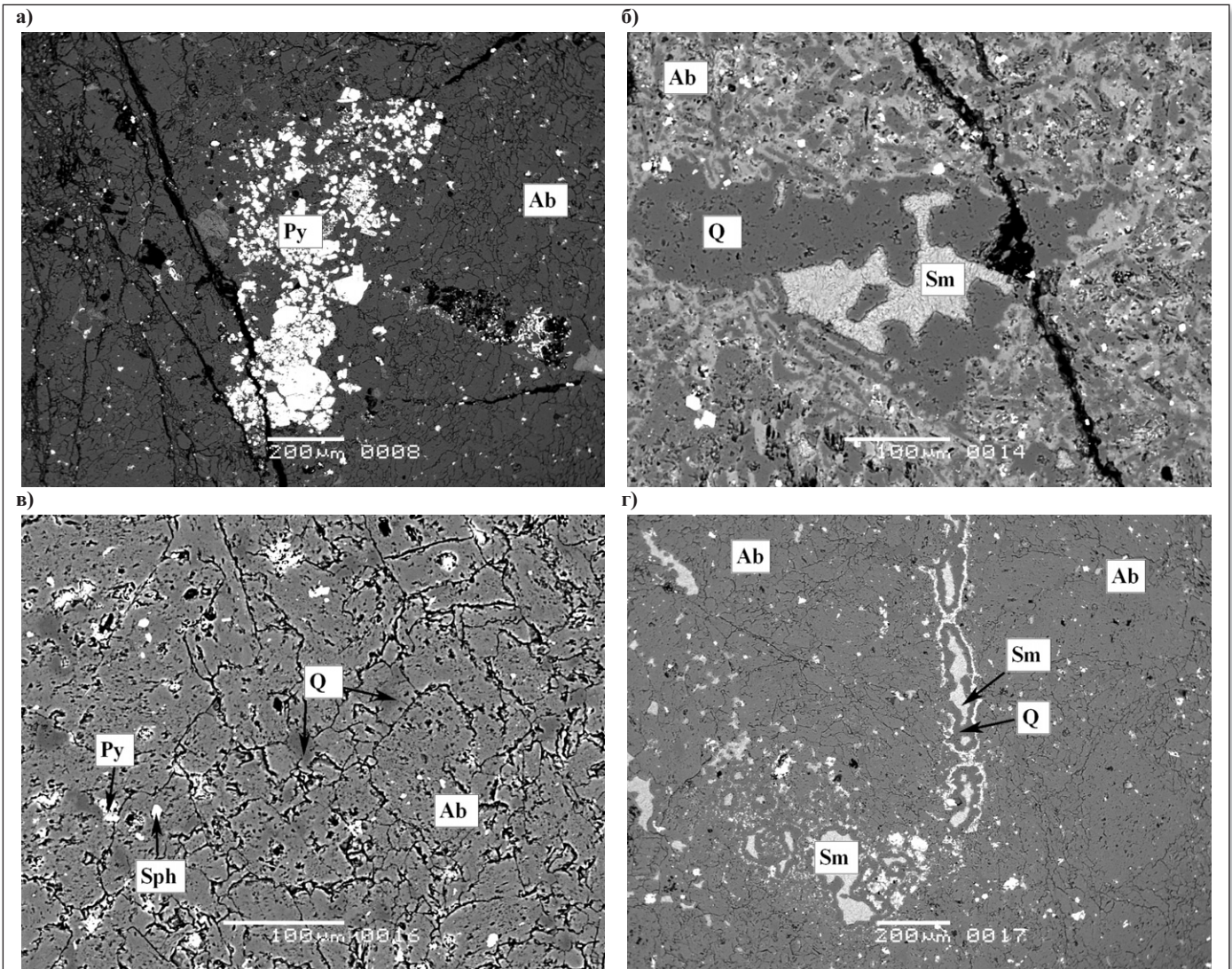


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки андезита в зоне наиболее интенсивного изменения (зона 3): а — скопление зерен пирита в альбитовой матрице; б — прямолинейная микротрещина, секущая пору; в — межкристаллические извилистые микротрещины; г — поры, вытянутые в цепочки, заполненные смектитами и кварцем. Ab — альбит, Py — пирит, Sm — смектиты, Q — кварц, Sph — сфен

переходе во вторую зону — до 60 МПа. В третьей зоне продолжается уменьшение прочности — в среднем до

32 МПа, однако для данной зоны характерен большой разброс значений — от 7 до 67 МПа. Это обусловлено различной интенсивностью переработки вещества в пределах зоны и неравномерным распределением вторичных минералов (в первую очередь кварца и смектитов) в объеме породы. В целом прочность коррелирует с плотностью ($r=0,94$) и пористостью ($r=-0,92$) пород и описывается экспоненциальным уравнением: $R_c = 0,0436 \cdot \exp(3,0974 \cdot \rho)$ (рис. 8).

Неизменные андезиты и породы первой зоны устойчивы к водонасыщению, их прочность снижается не более чем на 18%. Породы второй и третьей зон являются размягчаемыми: во второй зоне R_c при водонасыщении снижается на 60–70%, а в третьей — на 85–90%. Это обусловлено увеличением количества глинистых минералов в составе пород (до 21–23%) по мере приближения к термальному источнику.

Воздействие термальных вод на породы отражается на их магнитных характеристиках. Неизменные андезиты имеют высокую магнитную восприимчивость $\chi=34 \cdot 10^{-3}$ СИ, что обеспечивается присутствием титаномагнетита (рис. 7, e). В первой зоне она практически не изменяется ($33,2 \cdot 10^{-3}$ СИ). Во второй зоне наблюдается очень широкий разброс

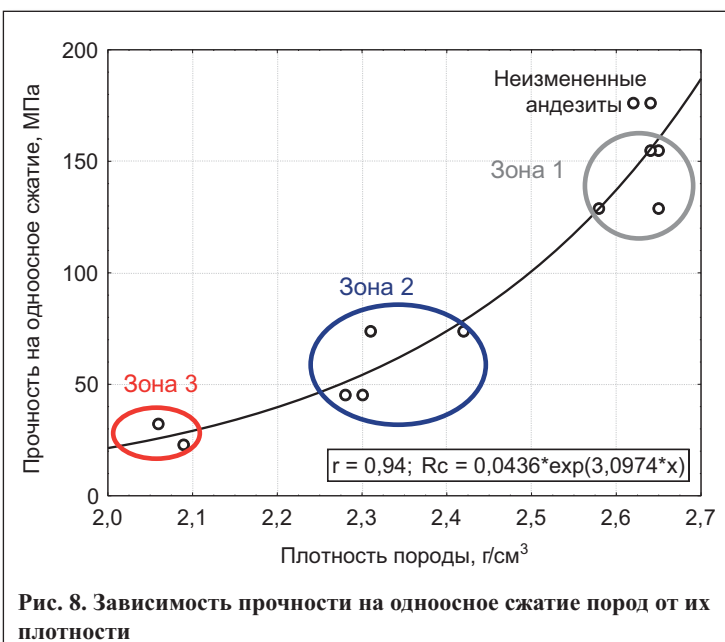


Рис. 8. Зависимость прочности на одноосное сжатие пород от их плотности

значений — одни породы имеют высокие значения ($30\text{--}35 \cdot 10^{-3}$ СИ), другие — низкие ($0,4\text{--}7 \cdot 10^{-3}$ СИ). Это связано с началом разложения титаномагнетита, которое носит неравномерный характер. Третья зона характеризуется низкими значениями ($0,7\text{--}6 \cdot 10^{-3}$ СИ), что обусловлено практически полным распадом титаномагнетита и преобладанием среди рудных минералов пирита.

На изменение прочностных и деформационных свойств андезитов в большой степени влияет содержание вторичных глинистых минералов (смектитов, каолинита, хлорита, смешанослойных), которое увеличивается от исходных андезитов к сильно изменен-

ным от 8 до 21–23%. С увеличением содержания глинистых минералов модуль упругости снижается более чем в 2 раза (рис. 9, а), прочность — в 5–6 раз (рис. 9, б). Гигроскопическая влажность, напротив, возрастает от 0,3 до 1% (рис. 9, в).

Заклучение

Исследования андезитов Большебанного района показали, что вблизи кипящего источника они претерпевают существенные изменения минерального состава, заключающиеся в альбитизации плагиоклазов, образовании глинистых минералов (смекти-

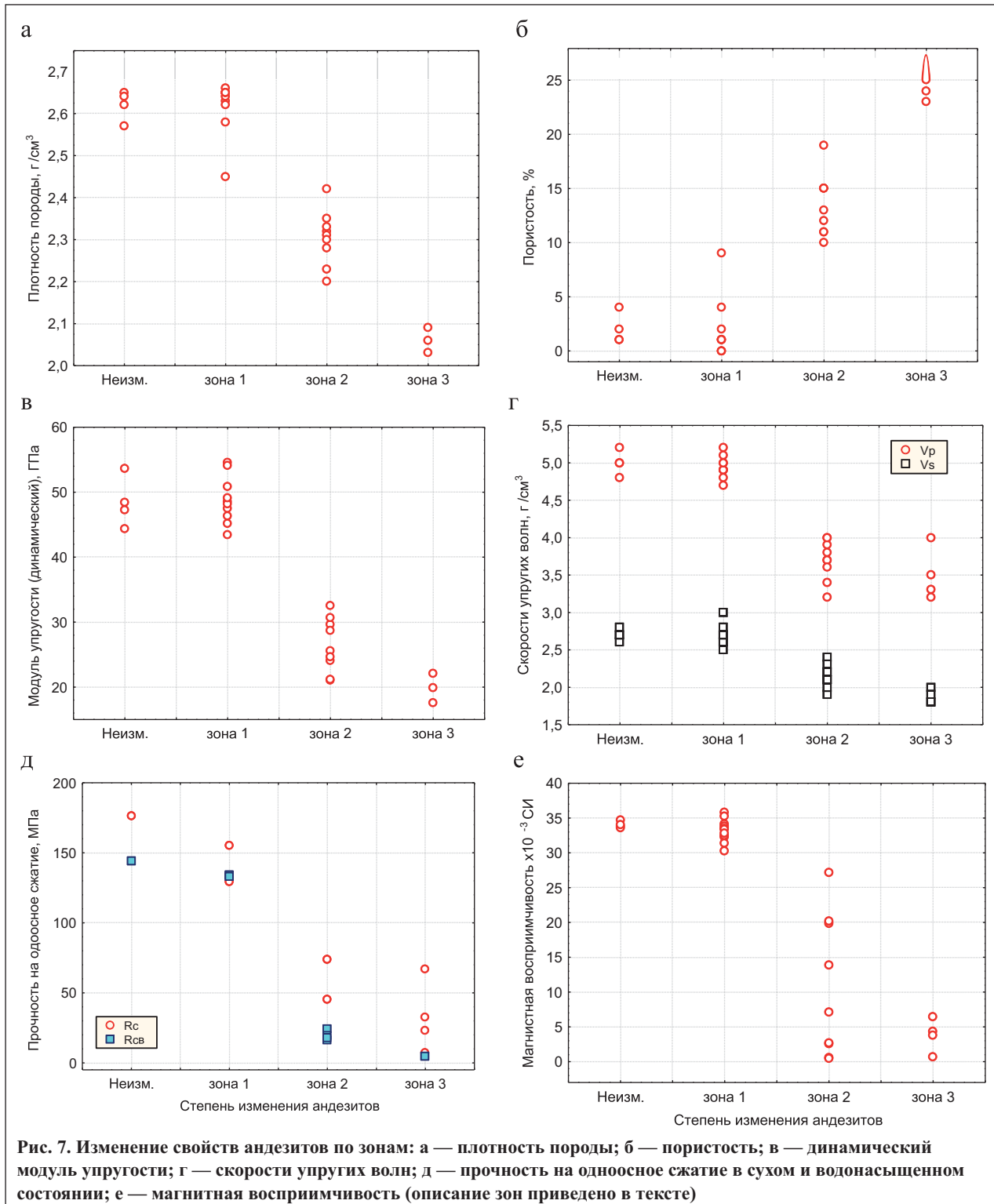
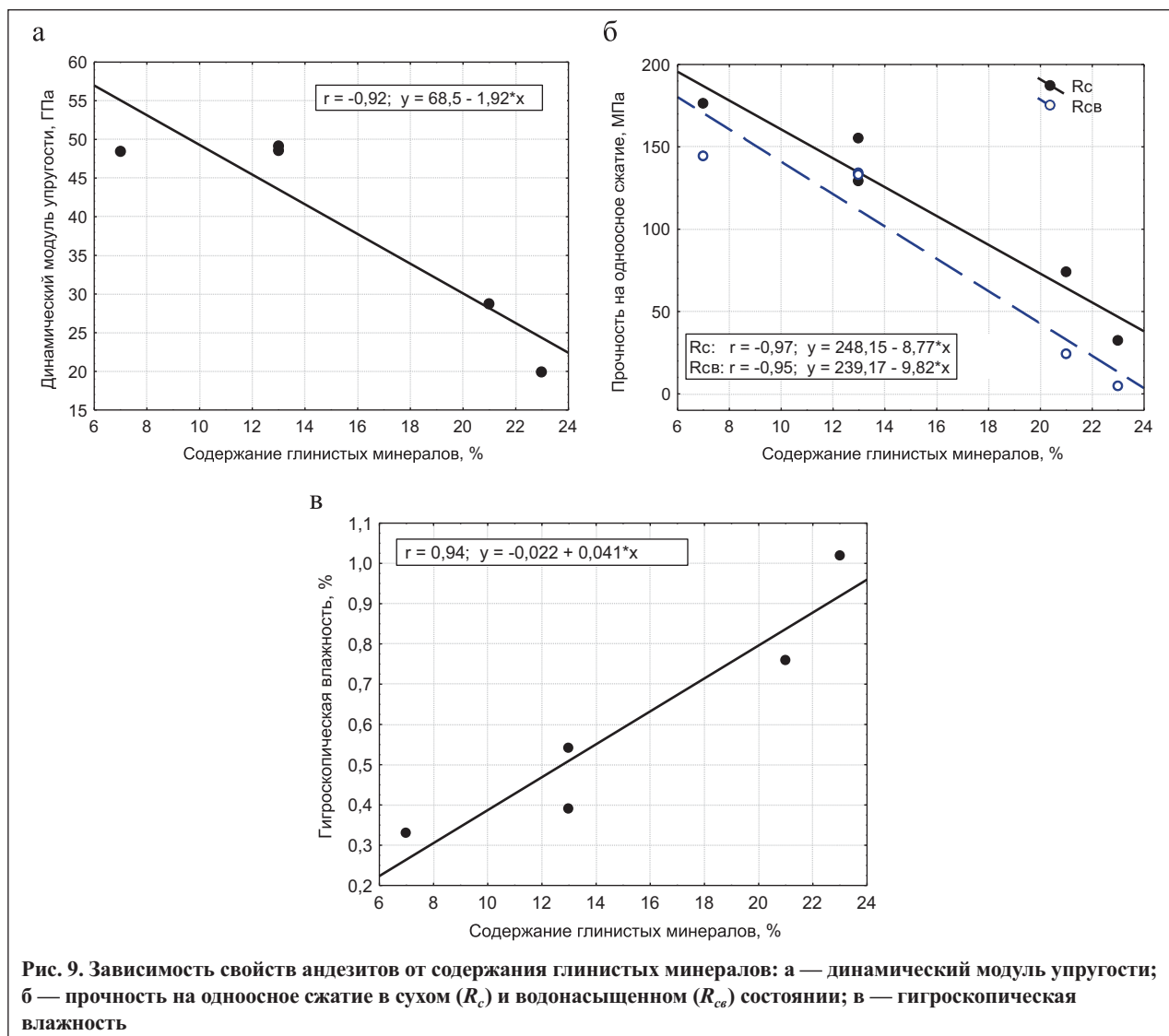


Рис. 7. Изменение свойств андезитов по зонам: а — плотность породы; б — пористость; в — динамический модуль упругости; г — скорости упругих волн; д — прочность на одноосное сжатие в сухом и водонасыщенном состоянии; е — магнитная восприимчивость (описание зон приведено в тексте)



тов, хлорит-сметкитов) и тонкозернистого кварца по первичным компонентам. Одновременно в породах формируется вторичная пористость и микротрещиноватость. Это вызывает разуплотнение пород и приводит к снижению значений прочности в 5–6 раз и модуля упругости более чем в 2 раза. Породы становятся размягчаемыми и гигроскопичными. Магнит-

ная восприимчивость снижается на один-два порядка, что обусловлено распадом титаномагнетита. Вышеописанные преобразования наблюдаются в радиусе до 1,5–2 м от кипящего источника. 🌐

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., 1984. 17 с.
2. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1984. 12 с.
3. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. М.: Изд-во стандартов, 1984. 35 с.
4. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24–37.
5. Краевой Ю.А., Охупкин В.Г., Серезников А.И. Результаты гидрогеологических и геотермических исследований Большебанной и Карымчинской гидротермальных систем. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 179–212.
6. Кононов В.И., Поляк Б.Г. Большебанные источники на Камчатке // Гидротермальные условия верхних частей земной коры. М.: Наука, 1964. С. 52–72.
7. Леонов В.Л., Rogozin A.H., Соболевская О.В. Результаты термометрической съемки Большебанных термальных источников (Южная Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 197–206.
8. Серезников А.И., Зимин В.М. Геологическое строение Паратунского геотермального района, влияние отдельных геологических факторов на современную гидротермальную деятельность. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 115–142.

9. Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 222 с.
10. Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. Закономерности преобразования состава и свойств вулканогенных пород в гидротермально-магматических системах Курило-Камчатской островной дуги // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2011. № 6. С. 52–60.
11. Фролова Ю.В., Чернов М.С. Формирование глинистых минералов в вулканогенных породах при гидротермальном литогенезе // Материалы третьего всероссийского совещания «Глины-2015»: тезисы. 2015. С. 70–72.
12. Чернев И.И. Мутновское геотермальное месторождение: результаты эксплуатации, мониторинг основных параметров, оценка влияния реинжекции на добычные скважины // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма (материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля — 6 августа 2005 г.). Петропавловск-Камчатский: ОТТИСК, 2005. С. 106–116.
13. Frolova Ju., Ladygin V., Rychagov S. and Zukhubaya D. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc // Engineering Geology. 2014. Vol. 183. P. 80–95.
14. Kiryukhin A.V., Miroshnik O.O., Maguskin M.A., Delemen I.F. Modeling and observations of the enthalpy, pressure, chloride, CO₂ and vertical deformation transient change in the Mutnovsky geothermal field (Kamchatka, Russia) // Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11–13, 2013. URL: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Kiryukhin.pdf>.
15. Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Droznin V.A., Chernykh E.V., Puzankov M.Y., Vergasova L.P. Geysers Valley Hydrothermal System (Kamchatka): Recent Changes Related to Landslide of June 3, 2007 // Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25–29 April 2010. URL: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/1515.pdf>.
16. Montanaro C., Scheu B., Gudmundsson M., Vogfjord K., Reynolds H., Durig T., Strehlow K., Rott S., Reuschle Th., Dingwell D. Multidisciplinary constraints of hydrothermal explosions based on the 2013 Gengissig lake event, Kverkfjoll volcano, Iceland // Earth and Planetary Science Letters (2015). URL: <http://dx.doi.org/10/1016/j.epsl.2015.11.043/>.
17. Reid M., Sisson Th., Brien D. Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, Mount Rainier, Washington // Geology. 2011. V. 29, № 9. P. 779–782.
18. Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Slope stability analysis in modern hydrothermal active areas // Global View of Engineering Geology and Environment: Proc. of the Internet. Symp. and 9th Asian Regional Conf. of IAEG (Beijing, 23–25.09.2013). London: CRC Press (Taylor&Francis Group), 2013. P. 225–228.

Журнал «Инженерная геология»

стал одним из наиболее востребованных печатных изданий в нашем профессиональном сообществе. Сотрудники редакции постоянно работают над дальнейшим повышением качества журнала. Все статьи проходят рецензирование членами редакционной коллегии и рецензентами, научное и литературное редактирование. Вы, читатели, можете внести свой вклад в развитие журнала, присылая в редакцию свои статьи и подписываясь на «Инженерную геологию».

E-mail: info@geomark.ru