

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТУФОГЕННЫХ ПОРОД ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ (ПОЛУОСТРОВ КАМЧАТКА)

ENGINEERING-GEOLOGICAL ASPECTS OF HYDROTHERMAL ALTERATIONS OF TUFFACEOUS ROCKS IN THE GEYSERS VALLEY (KAMCHATKA PENINSULA)

ФРОЛОВА Ю.В.

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, skalka@geol.msu.ru

ГВОЗДЕВА И.П.

Ведущий специалист лаборатории инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

ЧЕРНОВ М.С.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва

КУЗНЕЦОВ Н.П.

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

FROLOVA JU.V.

Associate professor of the Engineering and Ecological Geology Department of the Geology Faculty of Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Moscow, skalka@geol.msu.ru

GVOZDEVA I.P.

Leading specialist of the Laboratory of Engineering Geodynamics and Ground Engineering Protection Substantiation of the Engineering and Ecological Geology Department of the Geology Faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow

CHERNOV M.S.

Senior researcher of the Engineering and Ecological Geology Department of the Geology Faculty of Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), Moscow

KUZNETSOV N.P.

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

Ключевые слова:

Долина гейзеров; туфы; физико-механические свойства; гидротермальные преобразования; вторичные минералы; смектиты; оползень.

Key words:

Geysers Valley; tuffs; physical-mechanical properties; hydrothermal alterations; secondary minerals; smectites; landslide.

Аннотация

В статье рассматриваются гидротермальные преобразования туфогенных пород Долины гейзеров (полуостров Камчатка). Выделены две фации гидротермально-метасоматических пород — аргиллизиты и низкотемпературные пропилиты. Проанализирована динамика изменений физико-механических свойств пород при гидротермальных преобразованиях. Получены зависимости их прочностных и деформационных свойств от содержания вторичных минералов — цеолитов, глинистых минералов, кварца.

Abstract

Hydrothermal alterations of tuffaceous rocks in the Geysers Valley (Kamchatka Peninsula) are considered in the paper. Two facies of hydrothermal-metasomatic rocks such as argillized rocks and low-temperature propylites are distinguished. The time history of physical-mechanical properties of rocks at hydrothermal alterations is analyzed. Dependences of their strength and deformation properties on the content of secondary minerals such as zeolites, clay minerals, quartz are obtained.

Введение

Долина гейзеров входит в состав Кроноцкого государственного биосферного заповедника, который находится в списке всемирного наследия ЮНЕСКО в составе природного комплекса «Вулканы Камчатки». Ежегодно это место посещают тысячи туристов. Вместе с тем этот район является одним из наиболее опасных на Камчатке из-за интенсивного развития в его пределах обвально-оползневых процессов. В частности, большую известность Долина гейзеров приобрела в 2007 году, когда 3 июня на ее правом борту произошел катастрофический оползень (рис. 1) объемом по разным данным от 16,31 до 21 млн м³ [5, 22, 23], полностью изменивший ее рельеф, создавший запрудное озеро, уничтоживший или изменивший режим целого ряда гейзеров и только по счастливой случайности не повлекший за собой человеческие жертвы [5, 7, 15, 22].

Формирование оползней — явление далеко не редкое в Долине гейзеров. Помимо таких «классических» факторов, как особенности геологического строения, высокая тектоническая активность, сейсмичность территории, эрозионная деятельность реки, крутые борта долины, обильные осадки, развитию оползней способствует такая дополнительная причина, как интенсивная гидротермальная деятельность, характерная для

Долины гейзеров. Термальные воды, воздействуя на вмещающие породы, представленные высокопористыми туфами, вызывают их интенсивное преобразование [3, 13] и изменение физико-механических свойств.

Известно, что в зонах разгрузки современных гидротермальных систем широко распространены глинистые минералы. Замещающие первичные компоненты вулканогенных пород, они образуют так называемые аргиллизиты и, соответственно, зону аргиллизации [12]. Обычно эта зона формируется в верхней части разреза под действием термальных растворов с температурой до 100–150 °С, но иногда она распространяется и на более глубокие горизонты (до первых сотен метров). В зависимости от химического состава и кислотности термальных вод в зоне аргиллизации образуются различные минеральные ассоциации. В кислых условиях (рН менее 5) основными вторичными минералами являются каолинит, опал, кристобалит, алунит. Субнейтральные (до слабокислых) растворы способствуют формированию смектитов. В более щелочных условиях в ассоциации со смектитами образуются высококремнистые цеолиты (клиноптилолит, морденит, гейландит и пр.). Количество вторичных минералов может варьировать от первых процентов до полного замещения исходной породы, причем на термальных полях вулканические породы полностью трансформируются в глинистые грунты, что, естественно, сопровождается резким изменением их свойств. В более ранних работах авторов, проводившихся на территориях различных гидротермальных систем Курило-Камчатской островной дуги (Паужетской, Кошелевской, вулкана Баранского, Северо-Парамуширской, Мутновской, Эсовской и др.) показано, что аргиллизация вмещающих пород вызывает снижение их плотностных, прочностных и деформационных характеристик. Существенно возрастает гигроскопическая влажность, породы становятся неводостойкими (размягчаются или размокают). Постепенно они переходят в глины, приобретая пластические свойства, а иногда и способность к набуханию [11, 14, 18, 20, 21]. Гидротермальная переработка обычно сопровождается выносом петрогенных компонентов и, соответственно, формированием вторичной пористости. Однако проницаемость пород при этом снижается, так как образующиеся поры очень тонкие и не пропускают флюиды сквозь породу. Именно поэтому зона аргиллизации часто служит верхним водоупором в структуре гидротермальной системы.

Целью настоящей работы является оценка изменений физико-механических свойств пород района Долины гейзеров под действием термальных вод.

Геологические и геотермические условия

Долина гейзеров расположена в 180 км северо-восточнее г. Петропавловска-Камчатского в пределах Узонско-Гейзерной вулканотектонической депрессии, заполненной вулканогенно-осадочными отложениями четвертичного возраста (Восточно-Камчатский вулканический пояс). Долина представляет собой глубокий каньон реки Гейзерная, в бортах которого на площади около 6 км² находятся многочисленные термопроявления — гейзеры, горячие и кипящие источники, грязевые котлы, парящие площадки, термальные озера. Река

Гейзерная берет начало на склонах вулкана Кихпинич. Протекая по восточному краю Узонско-Гейзерной депрессии, она прорезает толщу пород на глубину около 700 м, врезаясь в заполняющие депрессию вулканогенно-осадочные отложения, а в среднем и нижнем течении она прорезает их на всю мощность и вскрывает более древние породы, относящиеся к фундаменту. Основные черты геологического строения района представлены в работах [1, 2, 9, 19]. Рассматриваемый район сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами плиоцен-плейстоценового возраста (точные датировки отложений дискуссионны). В районе выделяют три комплекса пород:

- докальдерный комплекс (Q₂), состоящий из дацитовых лав и крупнообломочных пемзовых туфов, вскрываемых в устье реки Гейзерная;
- комплекс, соответствующий этапу образования кальдеры (Q₃), в который входят кислые экструзии по бортам долины и покровы игнимбритов на водораздельных участках района;
- внутрикальдерный комплекс (Q₃⁴), представленный вулканогенно-осадочными отложениями (разнообразными туфами) мощностью до 600 м.

В гидрогеологическом отношении структура Гейзерной гидротермальной системы представляет собой артезианский склон [16]. Считается, что тепловое питание системы осуществляется в недрах вулкана Кихпинич. Подземные воды глубинной циркуляции, образующиеся при инфильтрации атмосферных осадков в области вулканического массива Кихпинич, нагреваются за счет тепла магматического очага и формируют восходящий поток гидротерм с температурой 250–330 °С. Двигаясь к поверхности, к зоне разгрузки, они смешиваются в разных пропорциях с холодными водами и, охлаждаясь, в том числе за счет потери пара, приобретают характер латерального потока с температурой воды 180 °С. Основная его разгрузка происходит в нижнем течении реки Гейзерная [6, 10]. По выносу тепла Гейзерная гидротермальная система является одной из самых мощных на Камчатке. Основными вмещающими породами системы являются отложения вулканогенно-осадочной толщи плейстоценового возраста, разделяемой на пачки — устьевую (ust), пемзовую (pmz), гейзерную (grn) и желтых скал (js) [1].



Рис. 1. Оползень в Долине гейзеров, произошедший в 2007 г. (фото 2013 г.). Высота стенки отрыва — 30–50 м

Методика исследований

Схема отбора образцов

В ходе полевых исследований, проведенных авторами в Долине гейзеров в 2013 г., были отобраны образцы туфов устьевой, гейзерной, пемзовой пачек и пачки желтых скал, а также монолиты образованных по туфам гидротермальных глин. Большая часть образцов туфов гейзерной и пемзовой пачек была отобрана из стенки отрыва оползня 2007 г., а также из склонов долины ручья Медвежий. Туфы устьевой пачки были отобраны в устье реки Гейзерная в месте ее впадения в реку Шумная, туфы пачки желтых скал — в верховьях одноименного правого притока реки Гейзерная. Всего было исследовано 29 образцов туфов.

Монолиты глин (2 шт.) были отобраны из обнажения стенки отрыва оползня, где они образовались по туфам гейзерной пачки, и в устье реки Гейзерная, где они являются продуктами переработки туфов устьевой пачки.

Лабораторные методы

Из каждого образца с помощью бурового, камнерезного и шлифовального станков было подготовлено от 5 до 15 проб цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру 2:1 и 1:1 (всего 255 проб).

В ходе лабораторных исследований определялись или вычислялись следующие свойства пород: плотность (ρ), плотность сухого грунта (ρ_d), плотность твердых частиц (ρ_s), пористость общая (n) и открытая (n_o), гигроскопическая влажность (W_c), водопоглощение (W_n), коэффициент газопроницаемости (K_c), скорость распространения продольных волн (V_p) в образцах, находящихся в сухом и водонасыщенном состоянии, скорость распространения поперечных волн (V_s), коэффициент Пуассона (μ), динамический модуль упругости (E_d), статический модуль упругости (E_{stat}), прочность на одноосное сжатие (R_c), коэффициент размягчаемости (K_{soft}), прочность на разрыв (R_p), удельное сцепление (C), угол внутреннего трения (ϕ). Для глинистых грунтов определялись гранулометрический состав (пипеточным методом), естественная влажность, плотностные свойства, пористость, гигроскопическая влажность, пределы и число пластичности (I_p), показатель консистенции (I_L), сдвиговые характеристики (по результатам неконсолидированно-недренированных испытаний грунта при естественной влажности). Все определения проводились по стандартным методикам [8, 17].

Одновременно с определением свойств были изучены состав и структура пород. Все образцы были описаны макроскопически и в шлифах с использованием оптического микроскопа Olympus-41BX (Olympus Corporation, Япония). Минеральный состав определялся на дифрактометре «ДРОН-3» (ЛНПО «Буревестник», Россия) аналитиком В.Л. Косоруковым. Часть образцов исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа с микрозондовой приставкой Jeol JSM-6430 (Japan Electron Optics Laboratory, Япония) аналитиком Е.В. Гусевой и растрового электронного микроскопа LEO 1450 VP (Carl Zeiss, Германия), оснащенного микрозондовым анализатором INCA Energy 300 (Oxford Instruments, Великобритания) аналитиками В.Н. Соколовым и М.С. Черновым. Структура порового пространства исследовалась на рентгеновском компьютерном

микротомографе Yamato TDM-1000 (Yamato Scientific, Япония) аналитиком М.С. Черновым.

Петрографическая характеристика и свойства вмещающих пород

Вмещающие породы Гейзерной гидротермальной системы представлены дацитовыми туфами плейстоценового возраста. По данным валового химического анализа, содержание SiO_2 варьирует в интервале 58–65%. Среди туфов выделяются две основные разновидности — мелкообломочные алевропелитовые («фарфоровидные») витрокластические (рис. 2) и крупнообломочные псаммито-псефитовые пемзовые с включением лито- и кристаллокластов (рис. 3). Под действием термальных вод туфы претерпели значительные вторичные изменения. По составу новообразований выделяются две гидротермальные фации — аргиллизиты (гидротермальные аргиллиты с высококремнистыми цеолитами и гидротермальные глины) и низкотемпературные пропилиты. Причем туфы гейзерной и пемзовой пачек претерпели гидротермальную аргиллизацию, а туфы устьевой пачки — пропилитизацию.

Туфы гейзерной и пемзовой пачек объединены в одну группу, поскольку они имеют сходные петрографические особенности и трудноразделимы. Среди них выделяются две разновидности, чередующиеся в разрезе, — алевропелитовые «фарфоровидные» и псаммито-псефитовые пемзокластические.

Туфы алевропелитовые «фарфоровидные» характеризуются светлой окраской с вариациями цвета от белого до светло-серого, кремового, иногда зеленоватого. Это туфы витрокластические, их основная масса сложена мелкими остроугольными обломками вулканического стекла размером 0,005–0,01 мм (реже до 0,02 мм). В небольших количествах (не более 5–10%) встречаются кристаллокласты плагиоклаза размером 0,01–0,05 мм, реже — единичные лито- или пемзокласты. Текстура туфов однородная, что видно как макроскопически, так и на изображениях произвольных срезов образцов, полученных с помощью микротомографа (см. рис. 2). При раскалывании породы образуется раковистый излом.

Туфы, слагающие верхнюю часть разреза, не взаимодействуют с термальными водами и поэтому являются неизменными; иногда они лишь незначительно выветрели (трещиноваты и ожелезнены).

Туфы, вмещающие термальные воды, в значительной степени преобразованы. В частности, основная масса, изначально сложенная мелкими обломками вулканического стекла, практически полностью замещена глинистыми минералами и цеолитами. Количество цеолитов, по данным рентгеновской дифрактометрии, варьирует от 44 до 97%. На снимках, сделанных под электронным микроскопом при больших увеличениях, наблюдаются две генерации цеолитов — волокнистые игольчатые (предположительно морденит) (рис. 4, а) и таблитчатые (гейландит) размером около 1 мкм (рис. 4, б). В основном они растут в свободном пространстве между обломками вулканического стекла. Образующиеся цеолитовые агрегаты являются высокопористыми, поэтому, хотя они и заполняют межобломочное пространство, пористость породы остается вы-

сокой. Глинистые минералы, представленные смекти-
тами с Mg-Na-обменным комплексом (реже с Mg-Ca-),
замещают вулканическое стекло; их содержание дости-
гает 22%. На рисунке 4, в показана начальная стадия
изменения вулканического стекла: видно, как изначаль-
но гладкая поверхность витрокласта выщелачивается
и становится чешуйчатой вследствие образования
смектитов. В ассоциации с глинами и цеолитами встре-
чаются низкотемпературные минералы группы крем-
незема. Следует отметить, что вторичные минералы за-
мещают вулканическое стекло (часто полностью) и рас-
тут в порах, но практически не затрагивают плагио-
клазы, которые остаются сохранными даже при интен-
сивной переработке породы. Но, поскольку содержание
плагиоклазов не превышает 10%, а в некоторых образ-
цах туфов они и вовсе отсутствуют, то в целом степень
переработки туфов высокая, в отдельных случаях она

достигает 100%, т.е. туфы превращаются в смектит-
цеолитовую породу. Микростроение этой породы мож-
но представить следующим образом: пористый каркас,
сложенный микрокристаллами цеолитов с цементаци-
онно-кристаллизационными контактами, полости ко-
торого заполнены смектитами, заместившими вулкани-
ческое стекло. Несмотря на практически полное изме-
нение минерального состава, первичная обломочная
структура туфа обычно сохраняется, т.е. замещение но-
сит псевдоморфный характер.

Алевропелитовые туфы легкие ($\rho=1,00\div1,43$ г/см³),
высокопористые ($n=52\div63\%$), гигроскопичные
($W_s=2,5\div3,4\%$), влагоемкие ($W_n=28\div51\%$) (табл. 1). Од-
нако, несмотря на высокую пористость (в том числе от-
крытую) и влагоемкость, эти туфы практически непро-
ницаемы. По-видимому, это связано с малым размером
пор: межобломочные поры имеют размер 1–5 мкм




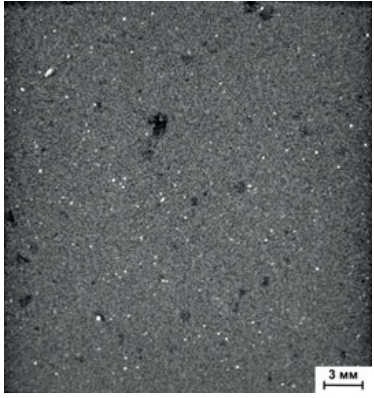

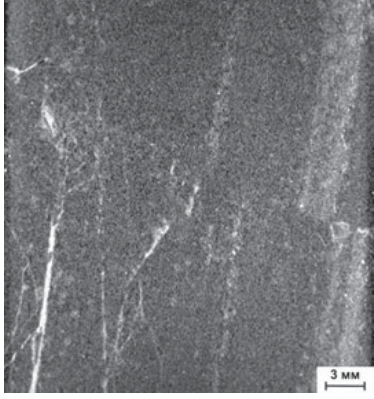
| Туф | Макрофотография (диаметр образца 3 см) | Компьютерная микротомография | Вторичные минералы (содержание, %) |
|---|---|--|---|
| Неизмененный |  |  | - |
| Аргиллизированный с высококремнистыми цеолитами |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Цеолиты: морденит-гейландит (84–97); • Mg-Na-смектит (3–16) |
| Пропилитизированный |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Кварц (30); • Са-смектит (24); • Mg-хлорит (7); • кальцит (6); • гидрослюда (4) |

Рис. 2. Алевропелитовые витрокластические туфы различной степени гидротермальной переработки

(рис. 5, в), а поры в новообразованных смектит-цеолитовых кристаллических агрегатах — доли микрометра (рис. 5, а, б). В таких порах движение газа или жидкости сквозь объем породы затруднительно. Между тем при

взаимодействии породы с водой в тонких порах формируется вода переходного типа (капиллярная, осмотическая), которая постепенно полностью заполняет все открытые поры, но не участвует в фильтрации. Значения




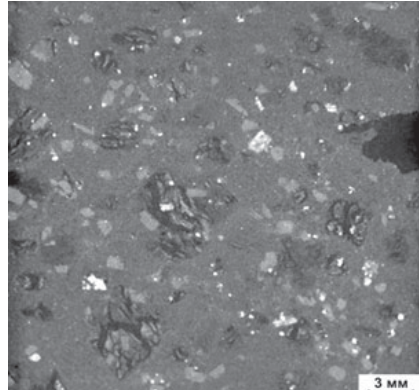

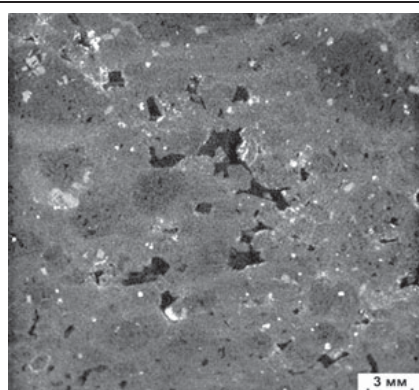

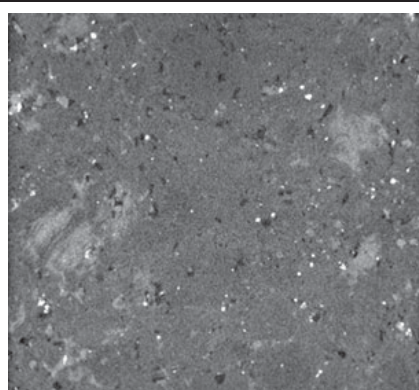
| Туф | Макрофотография | Компьютерная микротомография | Вторичные минералы (содержание, %) |
|---|---|--|--|
| Неизмененный |  |  | - |
| Аргиллизированный с высококремнистыми цеолитами |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Цеолиты: морденит-гейландит (2–87); • Mg-Na-смектиты (1–26); • анальцит (до 17); • кварц (до 34) |
| |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Кристобалит (69); • цеолиты (16); • тридимит (12); • Mg-Na-смектиты (3) |
| Пропилитизированный |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Кварц (30–50); • Mg-хлорит (6–7); • пренит (до 10); • кальцит (до 8); • гидрослюда (до 4); • смешанослойный слюда-смектит неупорядоченный (до 2); • цеолиты; • эпидот; • пирит |

Рис. 3. Пемзовые псефитовые туфы различной степени гидротермальной переработки

упругих свойств невысокие: $V_p=1,8\div 2,4$ км/с в сухом состоянии, при водонасыщении V_p снижается на 6–15%; $E_d=3,1\div 4,7$ ГПа; $\mu=0,20\div 0,24$. Прочность на одноосное сжатие составляет $15\div 25$ МПа, при водонасыщении она уменьшается в 3–5 раз, что обусловлено высоким содержанием глинистых минералов, способствующих ослаблению контактов при взаимодействии с водой. Удельное сцепление составляет 2,9–4,2 МПа в сухом и 0,2–1,9 МПа в водонасыщенном состоянии; угол внутреннего трения — 46–56 и 32–57° соответственно (см. табл. 1).

В зонах разломов, отличающихся трещиноватостью, брекчированностью и, соответственно, повышенной проницаемостью для термальных растворов, туфы превращаются в гидротермальные глины (см. рис. 5). Визуально они очень похожи на туфы, поскольку сохраняют тот же

цвет и наследуют обломочную туфовую структуру. В составе глин преобладает Са-сметтит (51%), в меньшем количестве присутствуют цеолиты и минералы кремнезема (табл. 2). Из первичных минералов сохраняются плагиоклазы. В гранулометрическом составе преобладают частицы глинистой (37%) и пылеватой (53%) фракций (рис. 6). Встречающиеся частицы песчаной фракции (10%), по-видимому, соответствуют кристаллокластам плагиоклаза, сохранившимся в глинистом матриксе. При преобразовании туфов в глины происходит их незначительное разуплотнение (у туфа $\rho_d=1,0$ г/см³, $n=58\%$; у глины $\rho_d=0,86$ г/см³, $n=64\%$) и существенное разупрочнение: удельное сцепление снижается на два порядка, до 0,03 МПа, угол внутреннего трения — до 17°. Гигроскопическая влажность повышается до 4%, породы приобретают пластические свойства ($I_p=36$). Гидротермальные глины характеризуются текучей консистенцией ($I_L=1,2$), однако в природных условиях они обладают некоторой прочностью, т.е. находятся в скрытотекучем состоянии. По-видимому, это обусловлено присутствием минералов кремнезема, которые формируют в глинах своеобразный жесткий каркас. По классификации ГОСТ-25100 [4] такие грунты относятся к тяжелым глинам.

Псаммито-псефитовые пемзокластические туфы характеризуются разнообразной окраской — от светло-бежевой до серой, зеленой с белыми включениями или пестрой. Структура меняется от псаммитовой до мелко- и крупнопсефитовой. Обломочный материал представлен в основном пемзокластами, реже встречаются кристаллокласты и литокласты. По структурным особенностям выделяются две разновидности этих туфов. В первом случае обломочная часть сложена практиче-

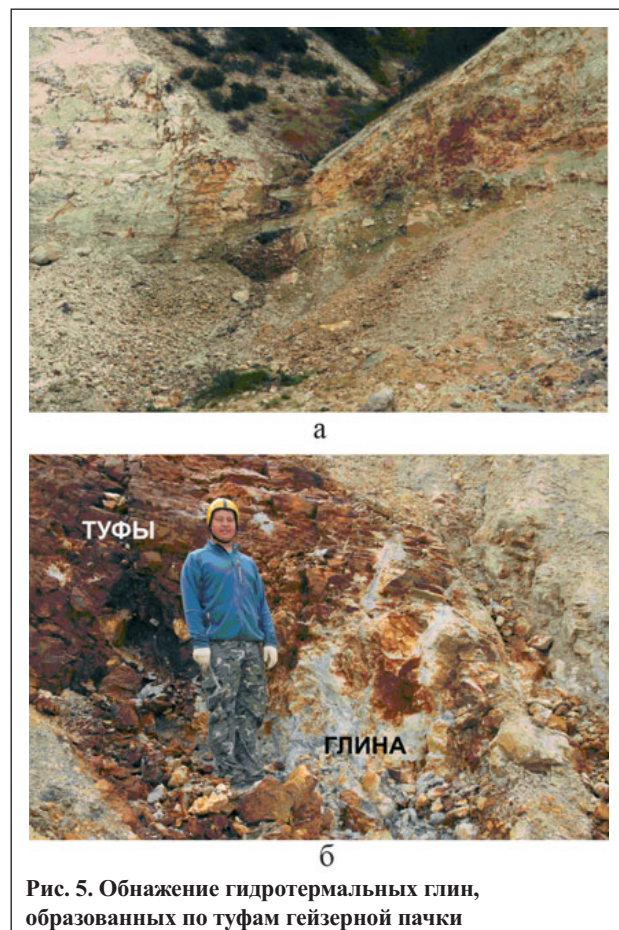
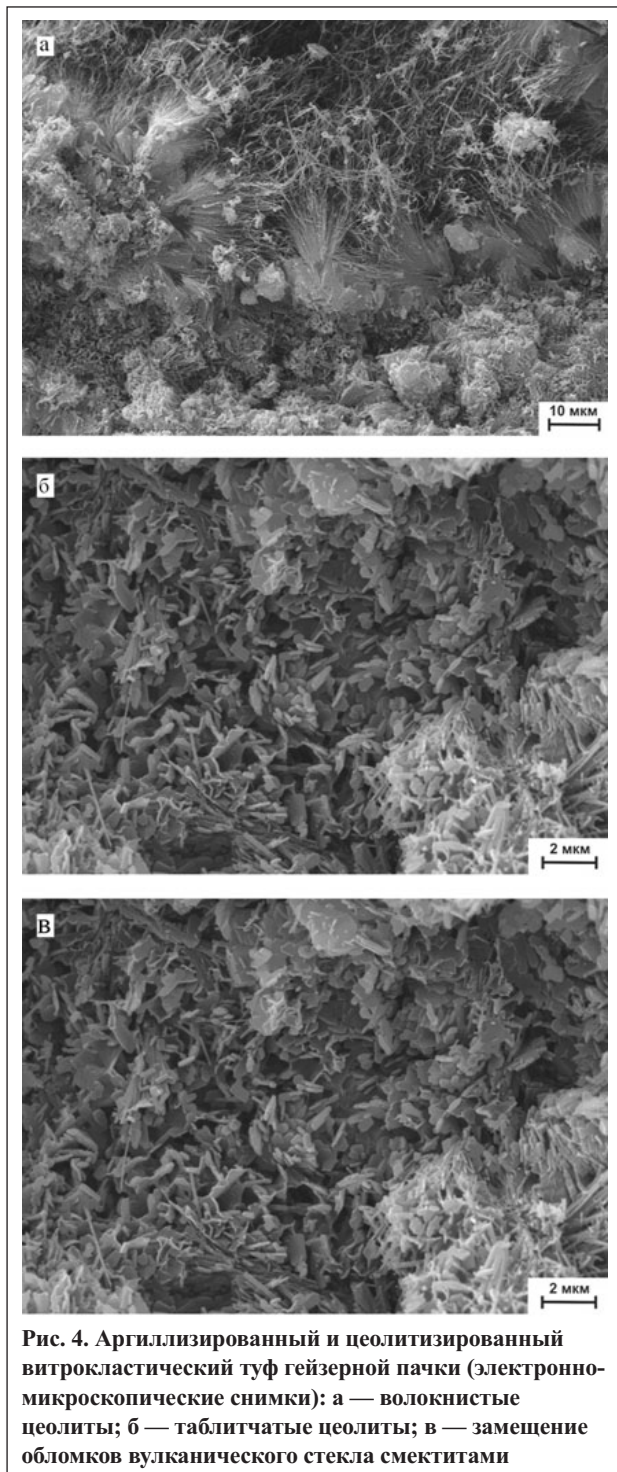


Таблица 1

| Влияние гидротермальной переработки на свойства туфов* | | | | | | | | | | | |
|--|--|--------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|------------|-------------|-------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|
| Породы | | Количество образцов/проб | ρ_d , г/см ³ | ρ_s , г/см ³ | n , % | K_r , мД | E_d , ГПа | R_c , МПа | K_{soft} , д.ед. | C , МПа (сух./вод.) | ϕ , град. (сух./вод.) |
| Алевропелитовые витрокластические туфы | неизмененные (gm, pmz) | 1/8 | 1,30 | 2,74 | 53 | 0 | 5,4 | 15 | — | 2,5 | 48 |
| | аргиллизированные и цеолитизированные (gm, pmz) | 6/56 | 1,20 | 2,56 | 56 | 0 | 4,8 | 22 | 0,34 | 3,8/1,1 | 51/50 |
| | гидротермальные глины по аргиллизированным туфам (gm) | 1 | 0,86 | 2,49 | 64 | — | — | — | размокает | 0,03 | 17 |
| | пропилитизированные (ust) | 1/11 | 1,51 | 2,70 | 44 | 0 | 8,4 | 15 | 0,49 | 3,7/1,6 | 38/43 |
| Псаммитопсефитовые пемзолитокластические туфы | неизмененные (gm, pmz, js) | 2/10 | 1,37 | 2,76 | 57 | 7,45 | 2,2 | 2,3 | 0,31 | 0,5 | 40 |
| | аргиллизированные и цеолитизированные (gm, pmz) | 13/121 | 1,13 | 2,60 | 58 | 2,61 | 4,4 | 7,9 | 0,37 | 1,6/0,6 | 44/42 |
| | пропилитизированные (ust) | 6/49 | 1,85 | 2,80 | 34 | 0,60 | 12,6 | 16 | 0,30 | 2,70/0,6 | 57/30 |
| | гидротермальные глины по пропилитизированным туфам (ust) | 1 | 1,32 | 2,63 | 50 | — | — | — | размокает | 0,29 | 34 |

* В таблице приведены средние значения показателей свойств: плотности сухого грунта ρ_d ; плотности твердых частиц ρ_s ; общей пористости n ; коэффициента газопроницаемости K_r ; динамического модуля упругости E_d ; прочности на одноосное сжатие R_c ; коэффициента размягчаемости K_{soft} ; удельного сцепления C ; угла внутреннего трения ϕ (сух. — в сухом состоянии, вод. — при водонасыщении)

ски исключительно пемзокластами. Во втором помимо пемзокластов в обломочной части встречается значительное количество кристаллокластов плагиоклаза (реже пироксена) — от 10 до 30%. В меньшем количестве присутствуют литокласты. Пемзокласты практически полностью замещены Mg-Na-смектитом и цеолитами (гейландитом, морденитом), причем цеолиты образуют микрокристаллы, которые неразличимы в шлифах, но хорошо диагностируются под электронным микроскопом. Как и в алевропелитовых туфах, выделяются две генерации цеолитов — волокнистые (толщиной в доли микрометров) и таблитчатые (от 1–2 до 20 мкм) (рис. 7). Цеолиты растут в порах пемзовых обломков (рис. 8). Смектиты замещают пемзовые обломки и стекловатую основную массу между обломками. На рисунках 8 а, б показан неизменный пемзовый обломок, сложенный аморфным вулканическим стеклом с гладкой поверхностью. При взаимодействии с термальными водами слагающее пемзу вулканическое стекло замещается смектитом с ячеистоподобной микроструктурой, а в порах кристаллизуются цеолиты (рис. 8, в–е).

Среди всех рассматриваемых пород пемзовые туфы (аргиллизированные и цеолитизированные) — наиболее легкие ($\rho=0,76\div0,99$ г/см³) и высокопористые ($n=65\div72\%$), с низкими модулем упругости ($E_0=1,8\div2,2$ ГПа) и прочностными свойствами (в сухом состоянии $R_c=0,8\div3,0$ МПа, при водонасыщении R_c снижается на 75%; $C=0,7\div1,0$ МПа; $\phi=24\div47^\circ$) (см. табл. 1). При замещении пемзовых обломков кремнистыми мине-

ралами (до 80% кристобалита и тримита) существенно возрастает плотность ($\rho=1,22\div1,24$ г/см³; $n=47\div49\%$), повышаются модуль упругости ($E_0=5,4\div7,8$ ГПа) и прочностные свойства ($R_c=11\div19$ МПа; $C=2,3\div2,7$ МПа, $\phi=48\div58^\circ$). Присутствие в пемзовых туфах лито- и кристаллокластов повышает их плотность до 1,13–1,36 г/см³ и снижает пористость на величину до 50–60%. Модуль упругости повышается до 3,4–5,9 ГПа, при этом $R_c=4,7\div10,3$ МПа; $C=1,1\div2,2$ МПа; $\phi=37\div50^\circ$. В отличие от алевропелитовых туфов, пемзовые туфы проницаемы, хотя и в разной степени: их газовая проницаемость варьирует в широком диапазоне — от 0,16 до 35 мД.

Туфы устьевой пачки

Среди туфов устьевой пачки также выделяются две разновидности — алевритовые и псаммитопсефитовые. В отличие от гейзерной пачки, все туфы устьевой пачки окрашены в зеленые цвета.

Алевритовые витрокластические туфы состоят из мелких остроугольных обломков вулканического стекла с редкими кристаллокластами плагиоклаза (0,05–0,1 мм). Туфы в значительной степени переработаны термальными водами. Ассоциация вторичных минералов (среди которых присутствуют хлорит, кальцит, Са-смектит, кварц, гидрослюда) является результатом низкотемпературной пропилитизации. Туфы сильнотрещиноватые. Трещины в них заполнены кальцитом и хлоритом, вулканическое стекло замещено Са-смектитом. Плотность туфов составляет 1,51 г/см³, пористость — 44%, $E_0=8,4$ ГПа, $R_c=15,4$ МПа (при водонасыщении R_c уменьшается в два раза); $C=3,7$ МПа; $\phi=38^\circ$ (см. табл. 1).

Псаммитопсефитовые пемзолитокластические туфы. Обломочная часть состоит из пемзо-, лито- (обломков эффузивных пород и туфов) и кристаллокластов (плагиоклазов). Размер обломков меняется от 0,5–2 мм до 0,5–1 см, встречаются крупные литокласты размером до 4–5 см. Цемент — поровый полиминеральный. Эти туфы испытали значительную переработку в условиях низкотемпературной пропилитизации. Вулканическое стекло и пемзокласты в них замещены Са-смектитом, хлоритом,

Таблица 2

| Минеральный состав туфа гейзерной пачки и образованной по туфу глины (по данным рентгенофазового анализа) | | | | | | |
|---|-----------------------|-------|----|------------------------------|-------|------------|
| Порода | Смектиты | | | Цеолиты (морденит-гейландит) | Кварц | Плагиоклаз |
| | с обменным комплексом | Mg-Ca | Ca | | | |
| Туф | | 22 | 44 | 24 | 10 | |
| Глина | | 51 | 2 | 34 | 13 | |

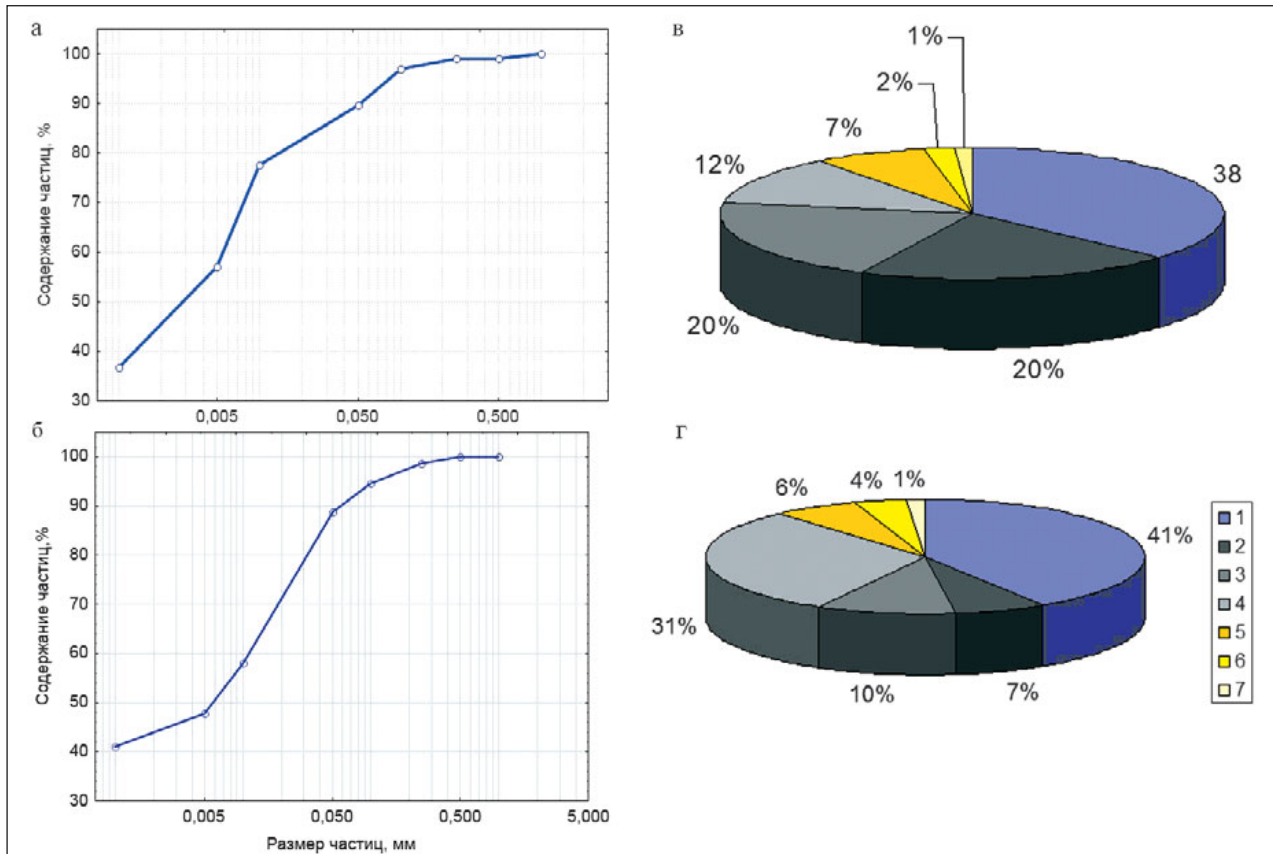


Рис. 6. Гранулометрический состав гидротермальных глин: интегральные кривые (а, б) и круговые диаграммы (в, г) для глин, образованных по туфу гейзерной пачки (а, в) и по туфу устьевой пачки (б, г). Фракции: 1 — <0,001 мм; 2 — 0,005–0,001 мм; 3 — 0,01–0,005 мм; 4 — 0,01–0,05 мм; 5 — 0,05–0,1 мм, 6 — 0,1–0,25 мм; 7 — 0,25–0,5 мм (а), 0,5–1 мм (б)

мелкозернистым кварцем, цеолитами. Плаггиоклазы серицитизированы, некоторые кристаллы выщелочены, а образовавшиеся полости заполнены цеолитами (рис. 9). В основной массе много мелкозернистого вторичного кварца (с размером зерен 1–10 мкм). Участки породы сложены кальцитом, встречаются зерна эпидота. Несмотря на практически полное изменение минерального состава, замещение носит псевдоморфный характер, что является характерной чертой метасоматоза. Туфы устьевой пачки — наиболее плотные среди туфов Долины гейзеров и с относительно высокими значениями показателей прочностных и деформационных свойств: $\rho=1,77\div 2,11$ г/см³, $n=31\div 40\%$, $E_0=6,4\div 14,2$ ГПа, $R_c=8\div 22$ МПа (при водонасыщении R_c уменьшается на 55–70%); $C=1,2\div 3,9$ МПа,

$\varphi=43\div 57^\circ$ в сухом состоянии; $C=0,4\div 1,9$ МПа, $\varphi=27\div 53^\circ$ в водонасыщенном состоянии (см. табл. 1).

В долине левого притока реки Гейзерная, расположенного на 200 м выше от места впадения в Шумную, туфы устьевой пачки переработаны в глины (пестрые буровато-красные с белыми включениями). Массив сильнотрещиноватый, по трещинам наблюдается ожелезнение. Видимая мощность глин составляет 2 м. Среди вторичных минералов преобладают Са-сметит (58%) и мелкозернистый кварц (40%), встречается хризотил (4%). Глина имеет псевдоморфную структуру, унаследованную от туфа. В гранулометрическом составе преобладают глинистая (41%) и пылеватая (48%) фракции, в меньшем количестве (11%) присутствуют

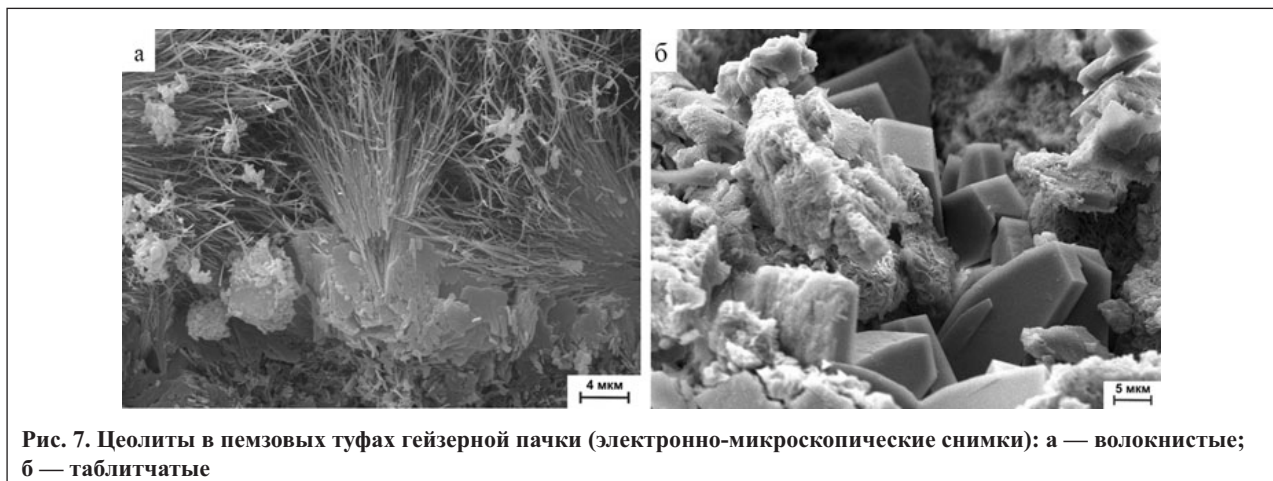


Рис. 7. Цеолиты в пемзовых туфах гейзерной пачки (электронно-микроскопические снимки): а — волокнистые; б — таблитчатые

песчаные частицы (см. рис. 6). При образовании глины по туфам устьевой пачки происходит разуплотнение ($\rho_d=1,32 \text{ г/см}^3$), повышение пористости ($n=50\%$), гигроскопической влажности ($0,9-1,8\%$ у туфов, до 5% у глины). Сцепление снижается на порядок — до $0,29 \text{ МПа}$, угол внутреннего трения — до 34° . В естественных условиях глина находится в твердом состоянии ($I_L=0,11$). По классификации ГОСТ 25100-2011 [4] этот грунт относится к легким пылеватым глинам с числом пластичности $I_p=18$.

Туфы пачки желтых скал

Туфы пачки желтых скал — псефитовые пемзоли-токластические, окрашенные в желтые оттенки. В обломочной части примерно в равных долях присут-

ствуют пемзо-, лито- и кристаллокласты (плаггиоклазы, роговая обманка, пироксены). Размеры обломков меняются от $3-4 \text{ мм}$ до $1-2 \text{ см}$, реже до 5 см . Обломки не несут следов современной гидротермальной переработки, практически свежими являются даже самые нестойкие пемзокласты. Среди литокластов встречаются пропилитизированные породы, однако процесс пропилитизации не является современным — он происходил в толще вулканогенных пород раньше, чем образовались туфы пачки желтых скал. Цемент в туфах поровый, тонкообломочный стекловатый.

Таким образом, все туфы Гейзерной гидротермальной системы — высокопористые, гигроскопичные, влагоемкие, неводостойкие, с низкой прочностью, в большинстве случаев они относятся к полускальным грунтам.

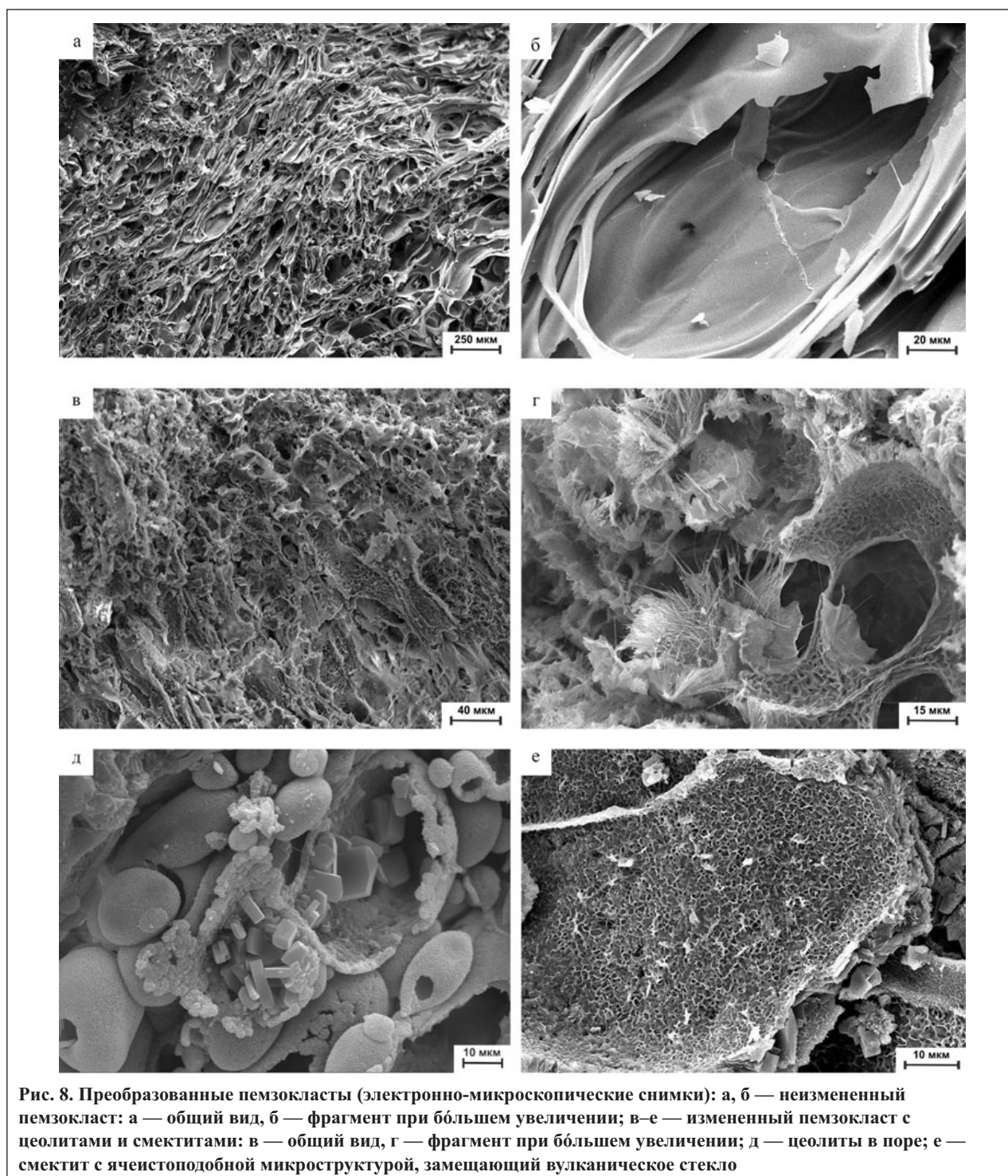


Рис. 8. Преобразованные пемзокласты (электронно-микроскопические снимки): а, б — неизмененный пемзокласт: а — общий вид, б — фрагмент при большем увеличении; в-е — измененный пемзокласт с цеолитами и смектитами: в — общий вид, г — фрагмент при большем увеличении; д — цеолиты в поре; е — смектит с ячеистоподобной микроструктурой, замещающий вулканическое стекло

Результаты и их обсуждение

Гидротермальные преобразования пород

Верхние части разреза Долины гейзеров, представленные туфами пачки желтых скал и верхней частью гейзерной пачки, не несут следов гидротермальной переработки. Нижняя часть гейзерной пачки вмещает термальные воды и с ними взаимодействует, в результате чего здесь сформировалась типичная зона аргиллизации, основными минералами которой являются Mg-Na-смектит и высококремнистые цеолиты, в меньшей степени — низкотемпературные кремнистые минералы (рис. 10). В условиях, характерных для данной зоны, перерабатываются вулканическое стекло и пемзокласты, тогда как лито- и кристаллокласты остаются относительно свежими. Поэтому степень переработки пород во многом зависит от их первичных особенностей: витро- и пемзокластические туфы практически полностью превращаются в смектит-цеолитовую породу, тогда как туфы, в состав которых входят кристалло- и литокласты, изменены в меньшей степени.

В распадах, пересекающих стенку отрыва, и, вероятно, приуроченных к зонам разломов, туфы перерабатываются до глин (см. рис. 5, рис. 10), которые визуальнo сходны с туфами, поскольку имеют псевдоморфную обломочную структуру, но отличаются от них пластичностью.

Туфы устьевого пачки, подстилающие гейзерную, заметно отличаются по вторичной минерализации. Основными вторичными минералами здесь являются хлорит, Са-смектит, кварц, кальцит, гидрослюда, цеолиты. Данная минеральная ассоциация образовалась в условиях низкотемпературной пропилитизации.

Динамика изменений физико-механических свойств туфов при взаимодействии с термальными растворами

Как видно из табл. 1, при аргиллизации и цеолитизации туфов не происходит резкого изменения их свойств. Наиболее заметно на минеральные преобразования реагирует плотность твердых частиц: наблюдается ее снижение от 2,74–2,76 г/см³ у неизмененных туфов до 2,56–2,60 г/см³ (в отдельных случаях до 2,33–2,36 г/см³) у аргиллизированных и цеолитизированных. Это вполне закономерно, так как плотность новообразованных смектитов, цеолитов (2,20 г/см³ у гейландита) и низкотемпературных минералов кремнезема (2,27 г/см³ у тридимита; 2,33 г/см³ у кристобалита) существенно ниже, чем у неизмененного вулканического стекла (2,70–2,75 г/см³). В частности, на рис. 11, з показана зависимость ρ_т туфов от содержания в них цеолитов. За счет снижения плотности твердых частиц происходит уменьшение плотности пород — от 1,30–1,37 г/см³ у неизмененных туфов до 1,13–1,20 г/см³ у аргиллизированных. Однако пористость пород, несмотря на значительные изменения их минерального состава, практически не меняется. Объясняется это следующим: с одной стороны, достаточно плотное вулканическое стекло замещается пористым смектитом, что способствует увеличению пористости, а с другой, новообразованные цеолиты заполняют межобломочное пространство, уменьшая пористость. Поскольку эти два процесса происходят одновременно, они нивелируют действие друг друга. При

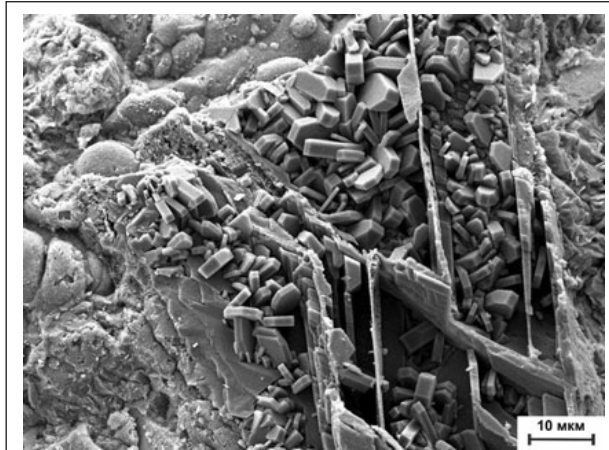


Рис. 9. Пропилитизированный туф устьевого пачки (электронно-микроскопический снимок): выщелоченный кристалл плагиоклаза с цеолитами, сформировавшимися в полости

переработке туфов происходит некоторое упрочнение, выражающееся в повышении прочности на одноосное сжатие, удельного сцепления и угла внутреннего трения (см. табл. 1). Это обусловлено развитием цеолитов и кремнистых минералов (кристобалита), образующих каркас с цементационно-кристаллизационными контактами между структурными элементами.

В отличие от аргиллизации, пропилитизация вызывает заметное изменение свойств туфов — уплотнение, снижение пористости, повышение упругих и прочностных характеристик (см. табл. 1, рис. 12). Уплотнение происходит, во-первых, вследствие заполнения пустотного пространства вторичными минералами, во-вторых, при пропилитизации образуются более плотные минералы (Mg-хлорит, кальцит, эпидот, рудные). Повышение значений показателей деформационных и прочностных свойств обусловлено уплотнением породы, а также минеральными преобразованиями, в первую очередь окварцеванием и карбонатизацией. В целом, на графиках (см. рис. 12) хорошо видно, что пропилитизированные туфы существенно плотнее, прочнее и имеют более высокие значения показателей деформационных



Рис. 10. Распределение гидротермально измененных пород в разрезе Долины гейзеров (стенка отрыва оползня высотой около 30 м образовалась в 2007 г.)

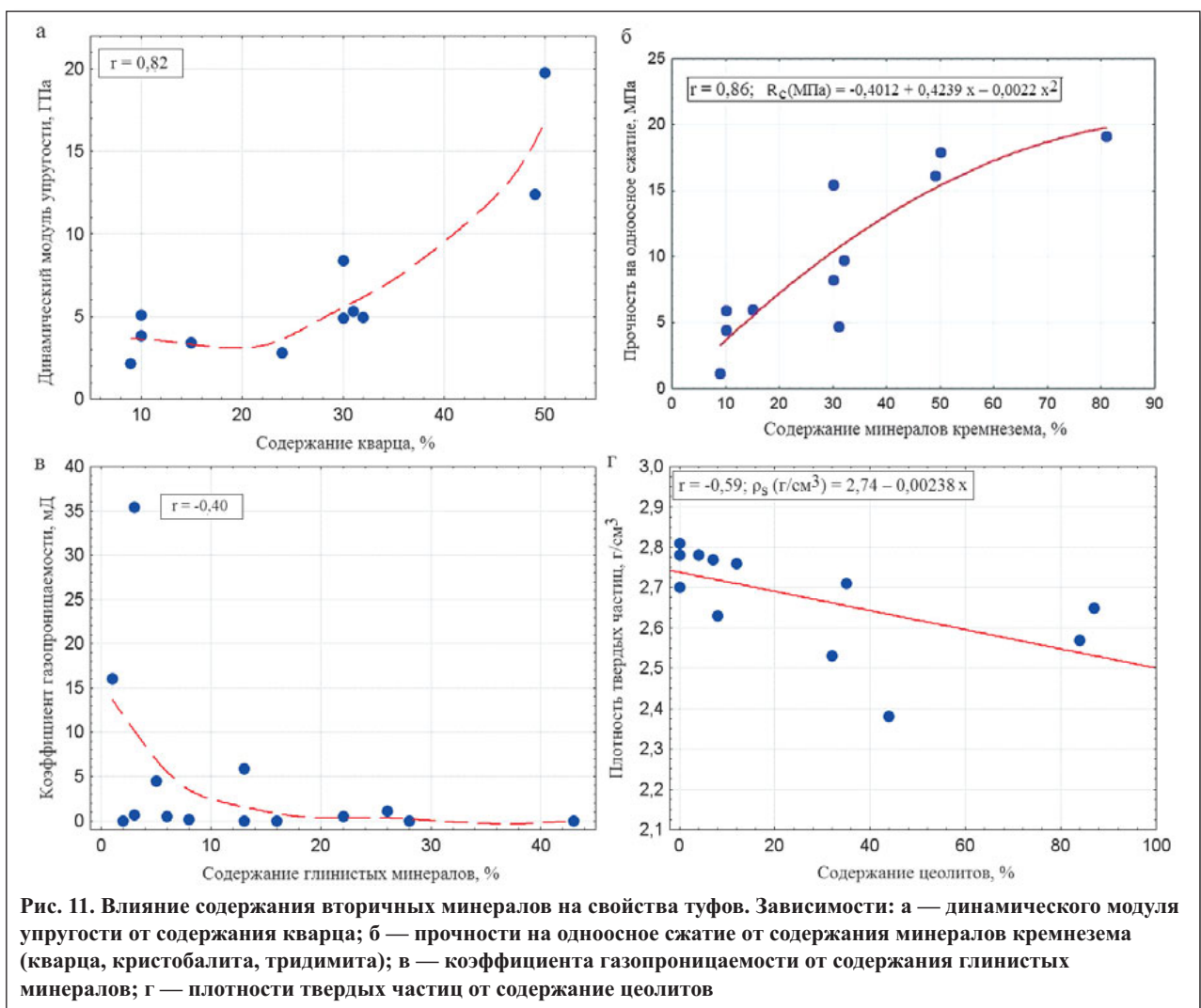
свойств, чем аргиллизированные. Вместе с тем на графиках зависимостей «прочность — пористость» (см. рис. 12, б), «прочность — скорость упругих волн» (см. рис. 12, з) из общего тренда выделяется группа алевропелитовых интенсивно цеолитизированных туфов. При значениях пористости 50–60% прочность большинства пород составляет 5–10 МПа, тогда как у алевропелитовых туфов она равна 20–25 МПа. Повышенная прочность обусловлена структурно-минералогическими особенностями этих пород — тонкообломочной (алевритовой) структурой с многочисленными контактами между обломками, текстурной однородностью (отсутствием концентраторов напряжений в виде крупных обломков или пор), развитием микрокристаллических цеолитов — волокнистых, игольчатых и таблитчатых, формирующих относительно прочный, хотя и высокопористый, каркас.

Наиболее сильные изменения свойств происходят при превращении туфов в гидротермальные глины. Меняются не только свойства, но и класс грунтов — скальные грунты превращаются в дисперсные. В этом гидротермальные преобразования имеют некоторое сходство с гипергенными процессами. Установлено, что глинистые грунты, образовавшиеся по алевропелитовым туфам гейзерной пачки, относятся к тяжелым глинам, а сформированные за счет гидротермального преобразования туфов устьевой пачки — к легким пылеватым глинам. В минеральном составе глин преобладает Са-сметит, также присутствуют кварц, цеолиты и реликты плагио-

клавов. Трансформация туфов в глины сопровождается появлением пластичности, увеличением пористости и гигроскопической влажности, снижением прочностных характеристик. Разница в величине сцепления туфов гейзерной пачки и образованной по ним тяжелой глины составляет два порядка; превращение туфов устьевой пачки в легкую пылеватую глину сопровождается снижением удельного сцепления на один порядок (см. табл. 1).

Влияние содержания вторичных минералов на свойства туфов

Выявить влияние содержания конкретного вторичного минерала на свойства туфов затруднительно, поскольку такая система является полиминеральной и включает как реликты первичных минералов, так и разнообразные гидротермальные минералы. Тем не менее некоторые закономерности установлены. В частности, содержание вторичного кварца влияет на упругие свойства (см. рис. 11, а). Причем критическое содержание кварца, с которого начинается его заметное влияние на модуль упругости, составляет 25%. Прочностные свойства туфов (R_c, C) тоже зависят от количества кварца, а также от суммарного содержания всех кремнистых минералов (кварца, кристобалита, тридимита) (см. рис. 11, б). Содержание глинистых минералов (сметитов, гидрослюд, смешанослойных минералов) влияет на проницаемость пород: в туфах, где количество глинистых минералов выше 15%, коэффициент газовой про-



нищаемости не превышает 1,1 мД, а в большинстве случаев он близок к нулю (см. рис. 11, в). При малом содержании глинистых минералов наблюдается большой разброс значений этого коэффициента (от 0 до 35 мД), свидетельствующий о том, что газовая проницаемость зависит не только от содержания глинистых минералов, но и от других факторов — морфологии порового пространства, размера пор и пр.

Заключение

Вмещающие породы Гейзерной гидротермальной системы представлены дацитовыми туфами плейстоценового возраста, среди которых выделяются две основные разновидности — алевропелитовые витрокластические и псаммито-псефитовые пемзовые с включением лито- и кристаллокластов. Под действием термальных вод туфы претерпели значительные вторичные изменения, вплоть до полного изменения минерального состава. По разрезу туфогенной толщи выделяются следующие зоны (сверху вниз):

- неизменные туфы;
- аргиллизированные и цеолитизированные породы, основными вторичными минералами которых яв-

ляются Na-Mg-сметит, высококремнистые цеолиты и низкотемпературные кремнистые минералы;

- низкотемпературные пропилиты с хлоритом, кварцем, кальцитом, гидрослюдой, Са-сметитом, цеолитами, эпидотом.

В долинах впадающих в реку Гейзерная распадков и ручьев, вероятно, приуроченных к зонам разломов, туфы часто преобразуются в гидротермальные глины.

В условиях аргиллизации и цеолитизации в туфах перерабатываются вулканическое стекло и пемзокласты, тогда как кристалло- и литокласты остаются свежими. Резких изменений свойств пород при этом не наблюдается. Наиболее заметно на минеральные преобразования реагирует плотность твердых частиц, а за счет ее снижения происходит и уменьшение плотности пород. Пористость практически не меняется, поскольку при переработке одновременно происходят два разнонаправленных процесса, нивелирующих действие друг друга: с одной стороны, плотное вулканическое стекло замещается пористым смектитом, что увеличивает пористость, а с другой, в поровом пространстве растут цеолиты, уменьшая пористость. При переработке туфов происходит некоторое их упрочнение, что обусловлено развитием цеолитов и кремнистых минералов, обра-

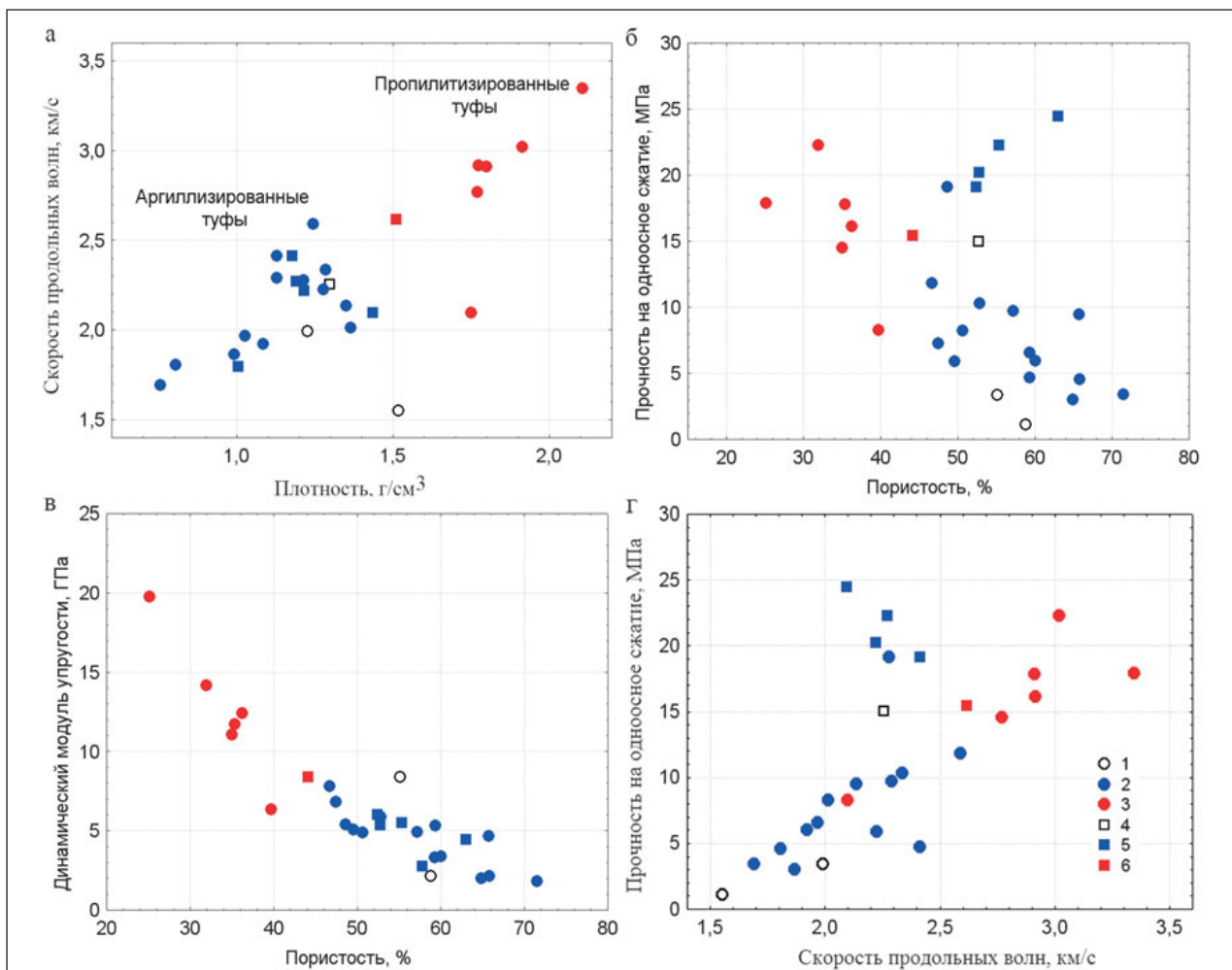


Рис. 12. Графики зависимостей. а — скорости продольных волн от плотности, б — прочности на одноосное сжатие от пористости; в — динамического модуля упругости от пористости; г — прочности на одноосное сжатие от скорости продольных волн. Условные обозначения: 1–3 — алевропелитовые туфы: 1 — неизменные, 2 — аргиллизированные, 3 — пропилитизированные; 4–6 — пемзовые псаммито-псефитовые туфы: 4 — неизменные, 5 — аргиллизированные, 6 — пропилитизированные; белый цвет символов — неизменные туфы, синий — аргиллизированные туфы, красный — пропилитизированные туфы

зующих каркас с цементационно-кристаллизационными контактами между слагающими его кристаллами.

В отличие от аргиллизации, пропицитизация вызывает заметное уплотнение пород, снижение пористости, повышение упругих и прочностных характеристик. Это происходит, во-первых, вследствие заполнения пустотного пространства вторичными минералами, во-вторых, в результате образования более плотных и прочных минералов (Mg-хлорита, кварца, кальцита, эпидота). В частности, образование вторичного кварца (и других кремнистых минералов) приводит к повышению показателей упругих и прочностных свойств, причем критическое содержание вторичного кварца, с которого начинается его заметное влияние, составляет 25%.

Образованные по туфам гидротермальные глины наследуют цвет и структуру исходных пород. Они имеют смектитовый состав с примесью цеолитов, минералов кремнезема и реликтовых зерен плагиоклаза. Превращение туфов в глины вызывает разуплотнение и разупрочнение пород (удельное сцепление снижается на один-

два порядка, угол внутреннего трения — в 2–3 раза), породы приобретают пластические свойства, увеличивается их гигроскопическая влажность.

В заключение следует отметить, что интенсивная современная гидротермальная деятельность в Долине гейзеров в сочетании с распространением мощной толщи аргиллизированных туфов (высокопористых, малопрочных, влагоемких, неводостойких) с горизонтами гидротермальных глин создает предпосылки для дальнейшей активизации обвально-оползневых процессов. ❖

Авторы выражают благодарность сотрудникам Кроноцкого заповедника за поддержку представленной в статье научных исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-05-00530-а, 13-05-10048-к, 14-05-00708а). Результаты исследований получены при использовании оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Геологические позиции гидротермальных систем Долины гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 65–79.
2. Брайцева О.А., Богоявленская Г.Е., Эрлих Э.Н. Геологическое строение Узонско-гейзерной депрессии / Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. С. 10–32.
3. Вергасова Л.П., Сандимирова Е.И., Москалева С.В., Крижановская М.Г., Душин-Барковская В.В., Пузанков М.Ю., Кирюхин А.В. Минералогическое исследование продуктов газо-гидротермальной деятельности термопроявлений у подножия обвального цирка, образовавшегося после катастрофического события 03.06.2007 в Долине гейзеров (Камчатка) / Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, г. Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 25–32.
4. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2011. 42 с.
5. Двигалю 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.
6. Действующие вулканы Камчатки. Том 2. М.: Наука, 1991. 415 с.
7. Дрознин В.А. О причине оползня в Долине гейзеров 4.06.2007 г. // Труды Кроноцкого заповедника. Вып. 2. 2012. С. 120–125.
8. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
9. Леонов В.Л. Геологическое строение каньона р. Шумной и Узонско-Гейзерная депрессия на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 100–103.
10. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/monograph/monleon/index.html>.
11. Лучко М.В., Зухубая Д.З., Фролова Ю.В. Петрофизические преобразования андезитов на Кошелевских термальных полях (Южная Камчатка) / Материалы 10-й Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: Изд-во ИФЗ, 2009. С. 250–254.
12. Набоко С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.
13. Набоко С.И., Главатских С.Ф. Высокремнистые цеолиты Долины гейзеров на Камчатке // Бюллетень вулканологической станции АН СССР. М.: Наука, 1978. № 55. С. 101–106.
14. Рычагов С.Н., Соколов В.Н., Чернов М.С. Гидротермальные глины как высокодинамичная коллоидно-дисперсная минералогическая система // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 435. № 6. С. 806–809.
15. Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дрознин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л. Жемчужина Камчатки — Долина гейзеров. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
16. Сугрובה Н.Г., Сугробов В.М., Романов В.В., Власова Л.С., Кудрявцева Т.Б. Третий в природных водах Долины гейзеров на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 3–18.
17. Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 222 с.
18. 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.
19. Эрлих Э.Н. Структурная приуроченность Узонско-Гейзерного геотермального района / Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. С. 5–10.
20. Frolova J., Ladygin V., Rychagov S. Petrophysical properties of argillitization zone in geothermal field / Geothermal Resource Council Transactions. Volume 30. Proceedings of the GRC 2006 Annual Meeting, San-Diego, CA, USA, 10–13 September 2006. P. 909–912.
21. Frolova J., Ladygin V., Rychagov S., Zukhubaya D. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc. // Engineering Geology. Netherlands: Elsevier BV, 2014. V. 183. P. 80–95.
22. 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 of the World Geothermal Congress. Bali, Indonesia, 2010. URL: <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/1515.pdf>.
23. Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Slope stability analysis in modern hydrothermal active areas / Global View of Engineering Geology and Environment: Proceedings of the International Symposium and 9-th Asian Regional Conference of IAEG, Beijing, 23–25.09.2013. London: CRC Press (Taylor&Francis Group), 2013. P. 225–228.