

ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД

FORMATION OF PHYSICAL MECHANICAL PROPERTIES OF EFFUSIVE ROCKS

ЛАДЫГИН В.М.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, skalka_1@mail.ru

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

СПИРИДОНОВ Э.М.

Профессор кафедры минералогии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., г. Москва

LADYGIN V.M.

Senior Research Scientist of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, skalka_1@mail.ru

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

SPIRIDONOV E.M.

Professor of the Department of Mineralogy, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow

Ключевые слова:

эффузивные породы; базальт; пористость; прочность; скорость упругих волн; микротрещиноватость; структуры; возраст.

Key words:

effusive rocks; basalt; porosity; strength; elastic wave velocity; micro-jointing; structures; age.

Аннотация

В статье рассмотрены инженерно-геологические особенности четвертичных эффузивов основного-среднего состава, отличающие их от других горных пород. Показан ряд особенностей этих пород: микротрещиноватость, увеличение пористости в ряду $Q_1-Q_{2-3}-Q_4$, зависимость свойств от структуры и текстуры породы, изменение свойств в процессе метаморфизма.

Введение

Вулканиды занимают особое место среди многочисленных типов скальных грунтов, и это обусловлено целым рядом причин.

1. Формирование этих пород происходило на протяжении всей истории развития Земли, и в настоящее время они слагают огромные пространства нашей планеты, встречаясь во всех основных тектонических структурах (в океанах, островных дугах, складчатых поясах и на платформах) и во всех стратиграфических единицах — от архея до голоцена.

2. Они продолжают формироваться в настоящее время, нередко принося огромные убытки и угрожая жизням сотен тысяч людей. Этот процесс можно наблюдать в районах современного вулканизма. Образование эффузивных пород при застывании лавы исчисляется минутами и часами, и в это время исследователь может видеть, как формируются поры различного размера и конфигурации.

3. Вулканиды уникальны в отношении физических и физико-механических характеристик. Пористость этих пород, относящихся согласно общей классификации грунтов к одной подгруппе, варьирует в диапазоне от 1–2 до 60–70%. Их прочностные и деформационные свойства также изменяются в широких пределах в зависимости от структурно-текстурных особенностей: скорость продольных волн составляет от 1,4 до 6,5 км/с, прочность при одноосном сжатии — от первых мегапаскалей до 400–600 МПа (табл. 1). Такая резкая разница в свойствах пород связана с условиями их образования и последующей геологической жизни.

Abstract

The article considers engineering and geological special features of Quaternary effusive basic and intermediate rocks. A number of peculiarities of these rocks are presented: micro-jointing, increasing of porosity in a series $Q_1-Q_{2-3}-Q_4$, dependence of properties from structure and texture of the rock, change of properties in metamorphic process.

Пределы изменения физических свойств и прочности эффузивных пород					
Характеристика	Плотность ρ , г/см ³	Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³	Пористость n , %	Скорость продольных волн V_p , км/с	Прочность при одноосном сжатии R_c , МПа
Значение	1,0–3,14	2,70–3,23	2–70	1,4–6,5	2–600

С массивами вулканогенных пород связаны месторождения золота, серебра, платины, цветных металлов, рения и прочих элементов, на них построены гидро- и геотермальные станции. Из вулканогенных пород делают лучшую щебенку, выплавляют базальтовые нити, используемые в космической промышленности. Именно в вулканитах образуются многочисленные месторождения агатов.

Среди вулканогенных пород выделяются различные петрографические типы — от риолитов до базальтов. Каждый тип имеет свои особенности образования, химического и минерального состава, строения, пористости и, соответственно, физических и физико-механических свойств. Среди вулканитов наиболее распространенными породами являются базальты, андезитобазальты и андезиты, которым и посвящена данная статья.

Методика исследований

Все обобщения и выводы сделаны по результатам наших многолетних исследований, на основании большой коллекции эффузивных пород, включающей более 7000 проб. В коллекции представлены образцы пород, собранные нами во время полевых работ на Камчатке и Курильских островах (Q, N, P, K), на Кавказе (Q, N, P, K, J), в Крыму (J), на Сибирской платформе (P–T), в Исландии (Q, N), Италии (Q), Амурской области (K), Красноярском крае (D), Карелии (Pr) и Казахстане (D). Многочисленные «региональные» коллекции любезно предоставлены нашими коллегами, которым мы выражаем глубокую благодарность: А.Р. Гептнером (Исландия — Q, N), Ю.С. Геншафтом (Шпицберген — Q, N), Ю.Н. Мельниковым (Камчатка — Q), С.Г. Тыриной (Русская платформа — T), П.Ю. Плечовым (Камчатка, Япония — Q), С.Н. Рычаговым (Камчатка и Курильские острова — Q, N), Т.И. Фроловой (Курильские острова — Q, N), В.М. Округиным и В.А. Рашидовым (Камчатка, островные дуги юго-западной части Тихого океана — Q), Г.Л. Кашицевым (Красное море, Тихий океан — Q), В.Б. Курносовым (Атлантический океан, Гавайи, Калифорнийский залив — N—Q), А.А. Булычевым и В.Б. Гилод (тройственная точка Буве, Атлантический океан — Q), А.Б. Белоусовым (Канарские острова — Q), А.В. Тевелевым (Урал — C, D), А.В. Самсоновым (Карелия — Ar), Е.Б. Золотых (Карелия — Pr), Ф.А. Романенко (Чукотка, Аннойский вулкан — Q), В.А. Королевым (вулкан Этна, Италия — Q₄).

Для лабораторных исследований из каждого монолита были приготовлены образцы правильной геометрической формы в виде цилиндров или прямоугольных призм (от 1 до 6 образцов). В ходе изучения

коллекции определялись и анализировались следующие физические и физико-механические свойства горных пород: плотность (ρ); плотность твердых частиц (ρ_s); пористость общая (n) и открытая по воде (n_o); величина водопоглощения (W_{II}); скорости распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн; магнитная восприимчивость (χ); динамический модуль упругости ($E_{дин}$); коэффициент Пуассона (μ); прочность при одноосном сжатии в сухом (R_c) и водонасыщенном ($R_{св}$) состоянии. Все физические и механические характеристики определялись по стандартным методикам [2–6].

Анализ свойств сопровождался детальным изучением химического и минерального состава пород, их структуры и текстуры, морфологии порового пространства. Все образцы описаны в шлифах (оптические микроскопы Olympus BX-41 и ПОЛАМ Л-211). Часть образцов исследована с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) с микрозондовой приставкой Jeol JSM-6430 (аналитики Е.В. Гусева, Н.Н. Коротаева) и РЭМ «LEO 1450VP», оснащенный микрозондовым анализатором «INCA 300» (аналитики В.Н. Соколов и М.С. Чернов). Исследования проведены с использованием оборудования, полученного в рамках реализации Программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

Характеристика эффузивных пород среднего и основного состава четвертичного возраста

Структурно-минералогические особенности. Эффузивы основного-среднего состава выделяются по содержанию SiO₂, которое составляет 44–53% у базальтов и андезитов, 54–63 (65%) у андезитобазальтов и андезитов.

Среди породообразующих минералов преобладают плагиоклазы, моноклинные и ромбические пироксены,



Рис. 1. Порфировая (а) и афировая (б) структуры базальтов (ширина поля зрения 4 см)

в меньшей степени — оливины и роговая обманка. Всегда присутствуют рудные минералы (часто титаномагнетит), но в относительно небольшом количестве. Неотъемлемым компонентом эффузивных пород является вулканическое стекло.

Помимо химического и минерального состава не менее важными факторами, влияющими на свойства эффузивов, являются их структурные характеристики. В петрографии выделяется более 40 типов структур. Но если рассматривать структуры по их влиянию на свойства пород, то наиболее важными являются порфировая и афировая структуры (рис. 1). Появление крупных порфировых вкрапленников, часто трещиноватых и содержащих дефекты, нарушает однородность

породы и обычно снижает ее деформационные и прочностные свойства.

Кроме общей структуры породы на свойства эффузивов влияет структура основной массы, которая зависит от количественного соотношения вулканического стекла и микролитов. Структура основной массы подразделяется на микрофитовую, интерсертальную, гиалопилитовую, витрофировую и метельчатую (рис. 2).

В качестве примера зависимости свойств от структуры основной массы можно привести эффузивы Армении, для которых плотность и прочность пород заметно увеличиваются при повышении степени их раскристаллизации (от витрофировой до микрофитовой структуры) (табл. 2) [1].

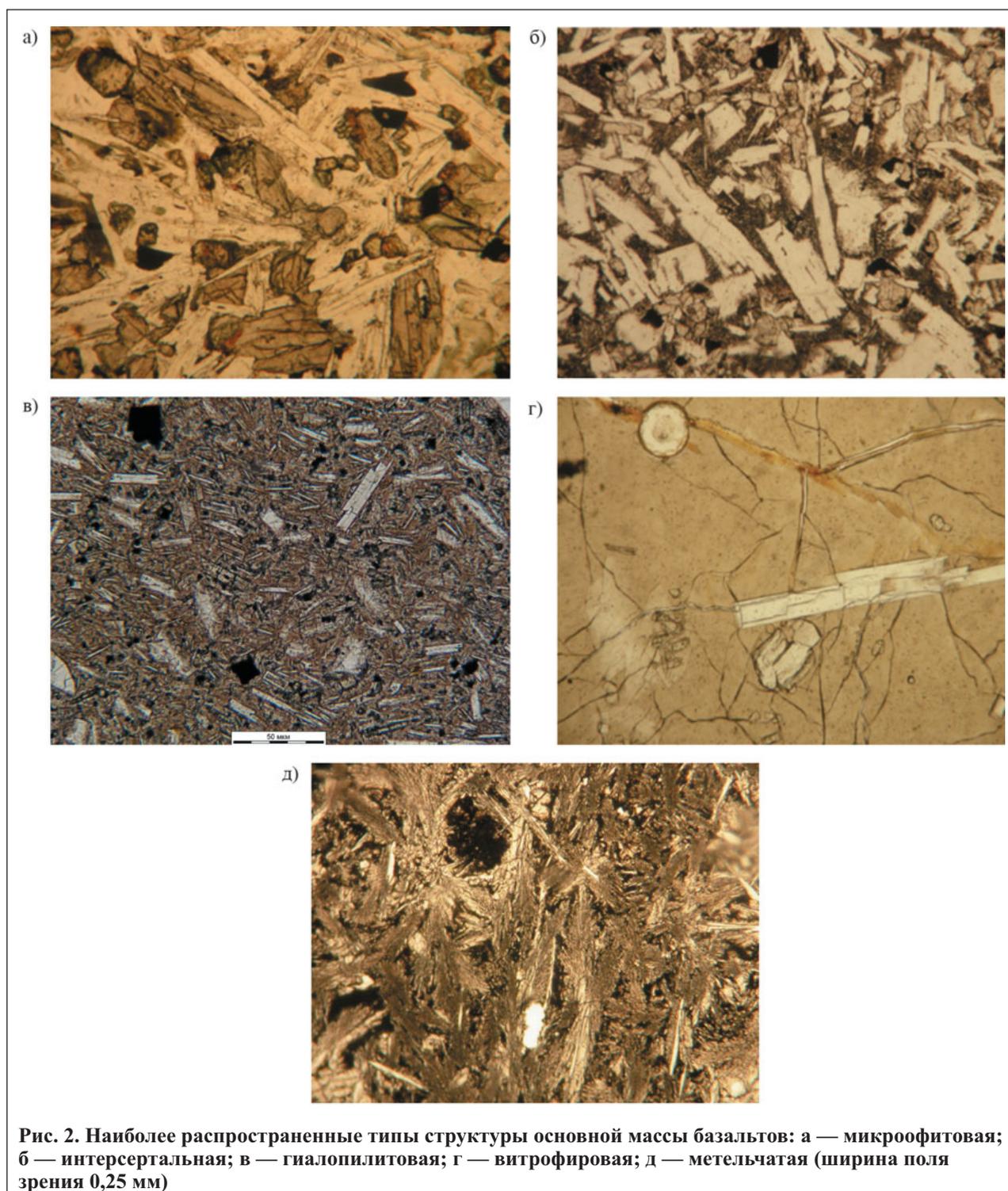


Рис. 2. Наиболее распространенные типы структуры основной массы базальтов: а — микрофитовая; б — интерсертальная; в — гиалопилитовая; г — витрофировая; д — метельчатая (ширина поля зрения 0,25 мм)

Зависимость свойств* эффузивных пород Армении от структуры основной массы				
Структура основной массы	Плотность ρ , г/см ³	Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³	Пористость n , %	Прочность при одноосном сжатии R_c , МПа
Витрофировая	1,58	2,85	45	41
Гиалопилитовая	2,29	2,85	20,3	92
Интерсерральная	2,44	2,87	14,7	122
Микроофитовая	2,65	2,91	9,5	163

*В таблице приведены средние значения показателей свойств.

Пористость. При излиянии жидкого магматического расплава на поверхность и его застывании происходит дегазация, в результате которой образуются газовые пузыри — поры различного размера (макро-, микро- и субмикроскопического). Пористые текстуры характерны для всех четвертичных эффузивов, независимо от химического состава магматического расплава, тектонического положения региона и

от условий остывания и кристаллизации лавы (водная или воздушная среда) (рис. 3).

Значительный разброс величины пористости обуславливает крайне широкий диапазон изменения значений всех физико-механических свойств. Физико-механические свойства вулканитов определяются в большей мере их текстурой — величиной пористости, соотношением пор по размерам и наличием мик-

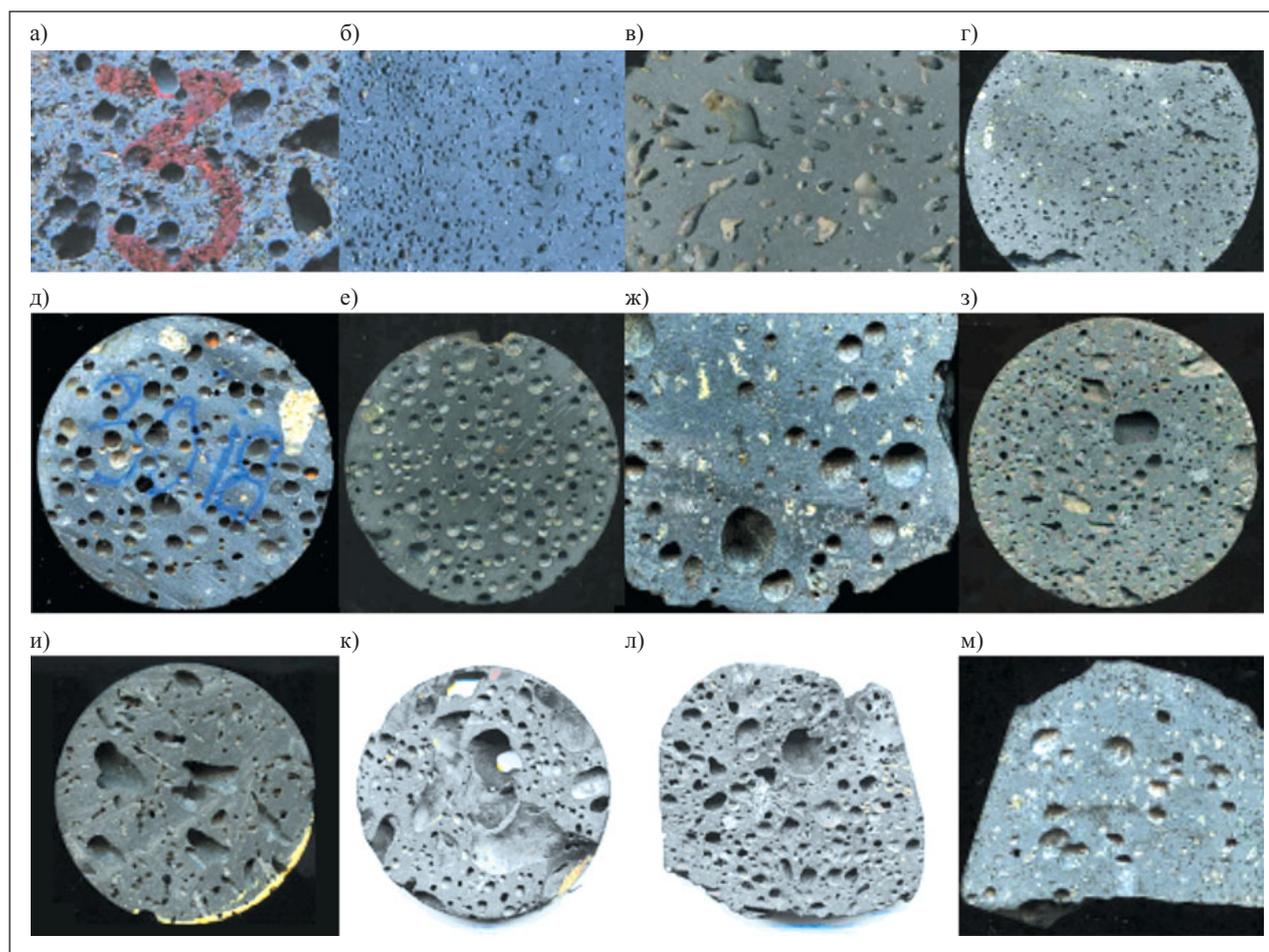


Рис. 3. Примеры пористых текстур четвертичных базальтоидов различных регионов: а — базальт (Q), остров Гавайи, 35×25 мм; б — базальт (Q), район острова Буве, дно Атлантического океана, 40×30 мм; в — базальт (Q), Центральная Исландия, 60 мм; г — базальт толентовый (плейстоцен), Исландия, 71 мм; д — щелочной базальт (плейстоцен), Шпицберген, 36 мм; е — щелочной оливиновый базальт (1 млн лет), Шпицберген, 36 мм; ж — базальты (Q_1), Бурятия, 48×41 мм; з — базальт (N_2), плато Ахурян, Армения, 55 мм; и — базальт (Q_4), вулкан Толбачик, Камчатка, 47×46 мм; к — базальт (6 млн лет), плато Озерновское, Центральная Камчатка, 60 мм; л — базальт высокоглиноземистый (Q_4), вулкан Ключевская сопка, Камчатка, 70 мм; м — базальт (Q_{2-3}), Алтай, 47×34 мм

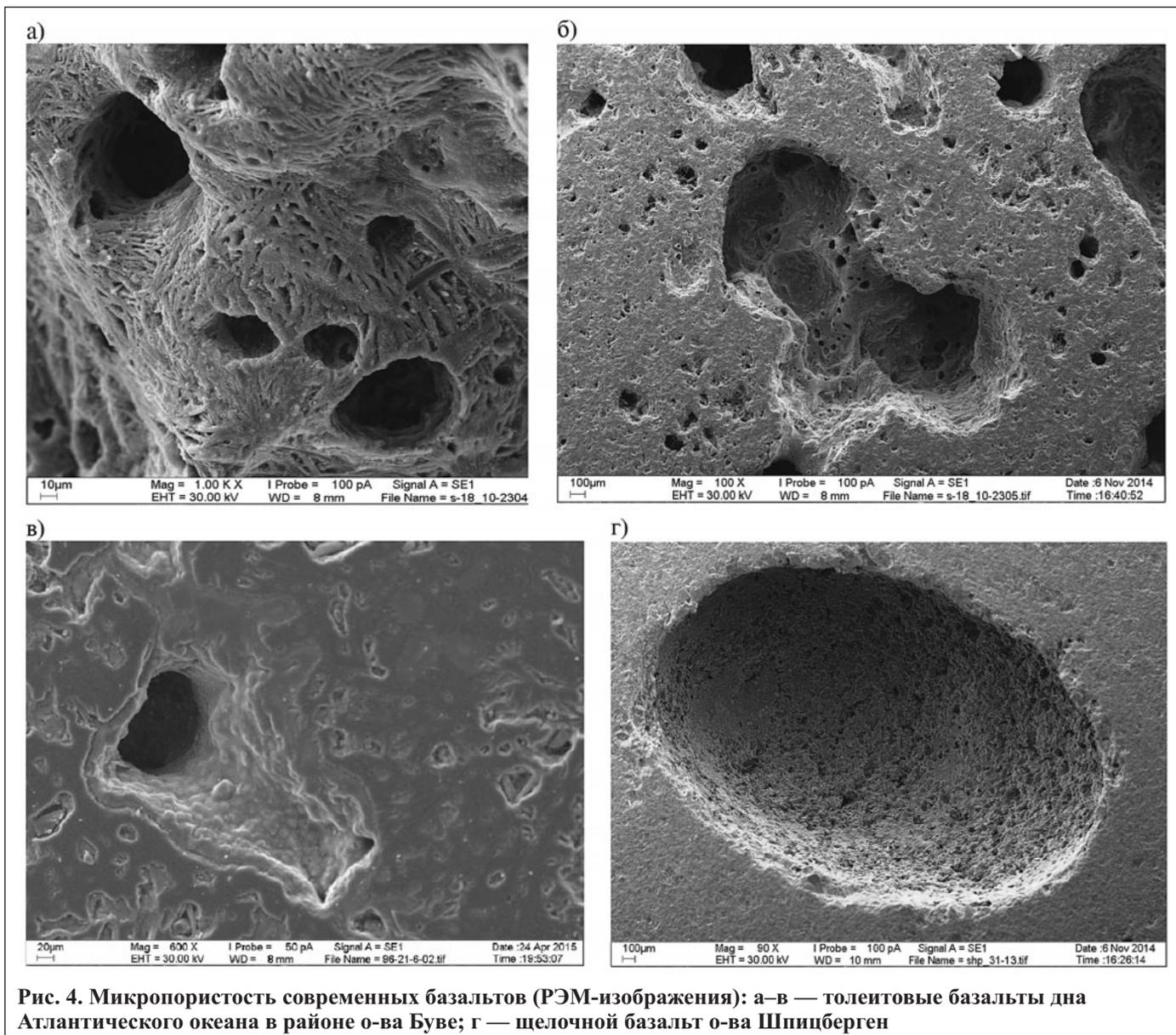


Рис. 4. Микропористость современных базальтов (РЭМ-изображения): а-в — толеитовые базальты дна Атлантического океана в районе о-ва Буве; г — щелочной базальт о-ва Шпицберген

ротрещиноватости, нежели минералогическим составом и структурой пород.

Принято считать, что основной вклад в величину пористости дают достаточно крупные поры (> 1 мм) — газовые пузыри. Наблюдения по нашим образцам это подтверждают. Между тем исследования, проведенные с помощью электронного микроскопа, показали, что значительную часть порового пространства занимают микропоры (рис. 4). Среди них выделено два типа [9]:

1) поры сложной, в первом приближении изометричной формы, сформированные в промежутках между микрокристаллами цементирующей массы базальтов (рис. 4, а); 2) каналы — протяженные микропоры со сложной морфологией, иногда примерно изометричные в поперечном сечении. Они присутствуют во всех изученных образцах базальтов, независимо от их возраста, химического состава, тектонического положения, как в наземных, так и в субмаринных. Диаметр

Таблица 3

Зависимость пористости и свойств эффузивных пород от времени излияния расплава*						
Возраст	Плотность ρ , г/см ³	Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³	Пористость n , %	Скорость продольных волн V_p , км/с	Прочность при одноосном сжатии R_c , МПа	Количество проб, шт.
Q ₄	2,31	2,84	18,4	3,05	92	1290
Q ₂₋₃	2,50	2,83	11,7	4,25	111	220
Q ₁	2,52	2,80	10,2	4,25	117	350

*В таблице приведены средние значения показателей свойств.

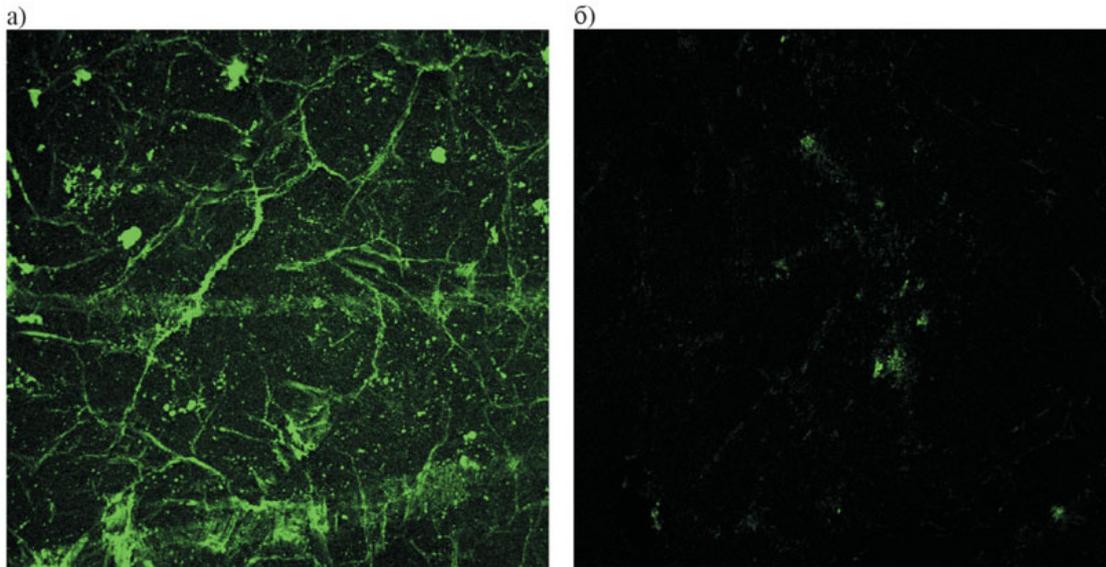


Рис. 5. Микротрещины в базальте: а — фотография сделана во флуоресцентном свете, после пропитки породы солидолом; б — та же поверхность без пропитки (ширина поля зрения 1 мм)

таких каналов варьирует от 1–2 до 100 мк и более, и они располагаются по всему объему породы. Нередко отверстия этих каналов выходят на всей внутренней поверхности крупных пор (рис. 4, б, з).

Еще одной особенностью, связанной с пористостью эффузивных пород, является зависимость ее величины от времени излияния расплава. Для четвертичных эффузивов Камчатки установлено, что величина пористости в голоценовых породах заметно увеличивается по сравнению с плейстоценовыми (табл. 3). Чем это обусловлено? Мы связываем количество пор в породе с содержанием газовой составляющей, приносимой расплавами из нижележащих слоев Земли. Таким образом, повышение в голоцене пористости пород может означать увеличение количества газов, поступающих на поверхность Земли в настоящее время. Поступление в больших количествах горячих газов, содержащих различные, не характерные для атмосферы Земли химические элементы, могло вызывать в голоценовое время изменения в климате планеты, что отмечается метеорологами. Для более уверенного вывода необходимо собрать дополнительные сведения по другим районам Земли.

После излияния и кристаллизации лавы начинается долгий путь изменения эффузивных пород и их свойств. Эффузивы с неизменными первичными минералами, с открытыми порами находятся на поверхности Земли и в разрезе вулканогенных пород в течение многих сотен тысяч и даже миллионов лет. Безусловно, они подвергаются процессам выветривания, возможно часть пор заполняется вторичными минералами (кальцитом) из поверхностных потоков воды, но в целом они остаются неизменными.

Скорость упругих волн и микротрещиноватость. Важной инженерно-геологической особенностью большинства современных эффузивов являются anomalously низкие значения скорости продольных волн ($V_p = 2-3$ км/с, реже до 4–4,5 км/с), которые наблюдаются даже при высокой плотности и массивной текстуре пород [7]. Впервые это явление «низких скоростей» было обнаружено в 1980 году [8]. При

сравнении упругих свойств базальтов и андезибазальтов Авачинского и Мутновского вулканов оказалось, что у первых значения V_p заметно ниже, чем у вторых,

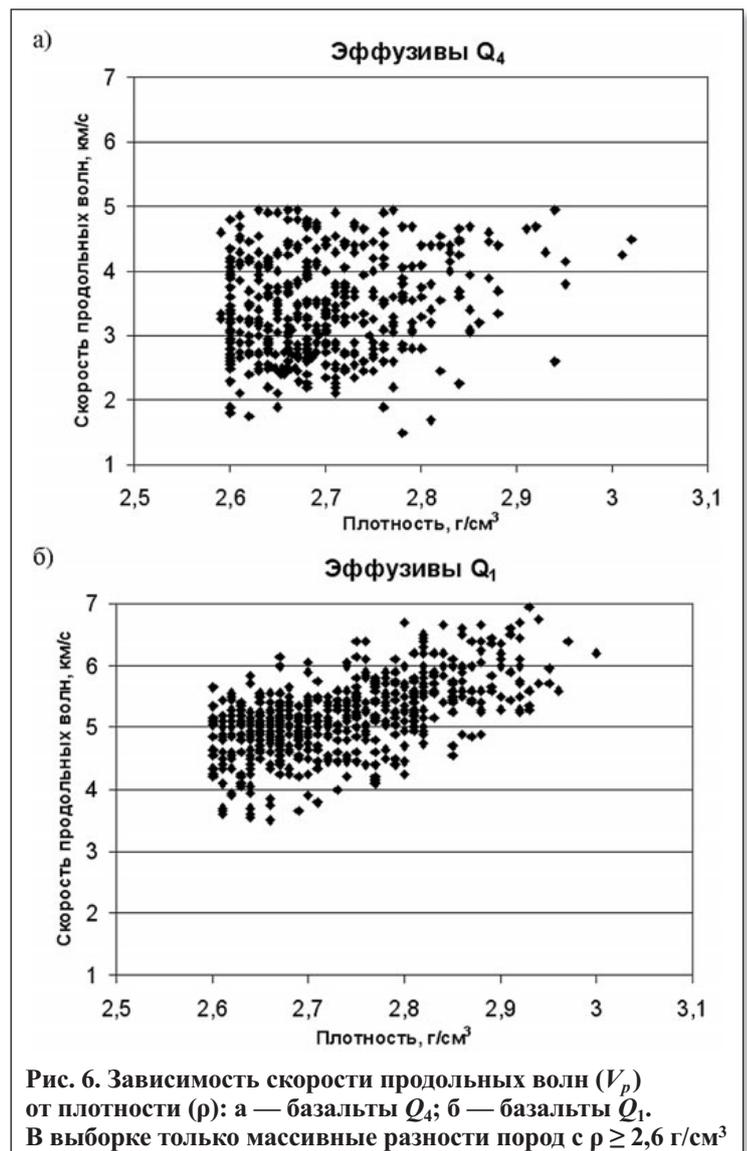


Рис. 6. Зависимость скорости продольных волн (V_p) от плотности (ρ): а — базальты Q_4 ; б — базальты Q_1 . В выборке только массивные разности пород с $\rho \geq 2,6$ г/см³

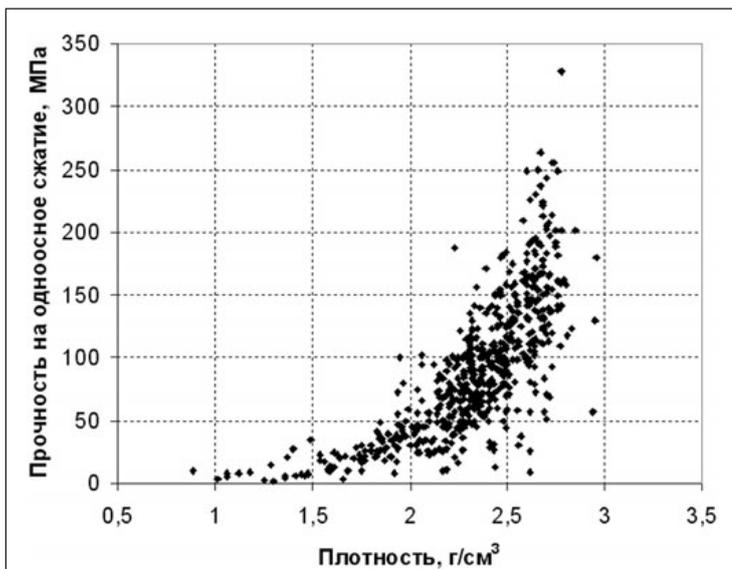


Рис. 7. Зависимость прочности на одноосное сжатие голоценовых эффузивов от плотности

при одинаковой пористости и одинаковой структуре основной массы пород. В качестве объяснения была выдвинута гипотеза об образовании микротрещин в породе при охлаждении и кристаллизации лавы, что

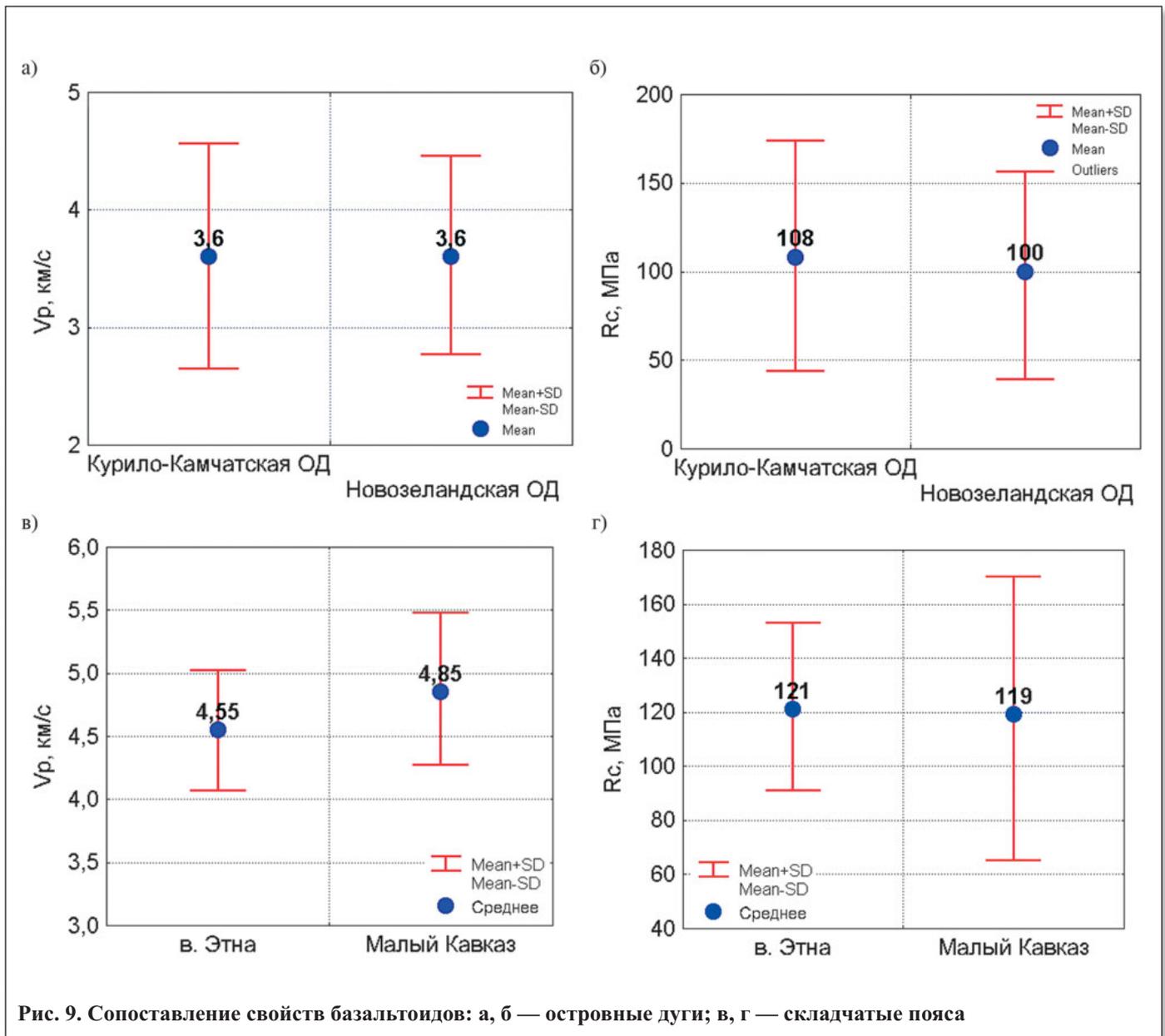
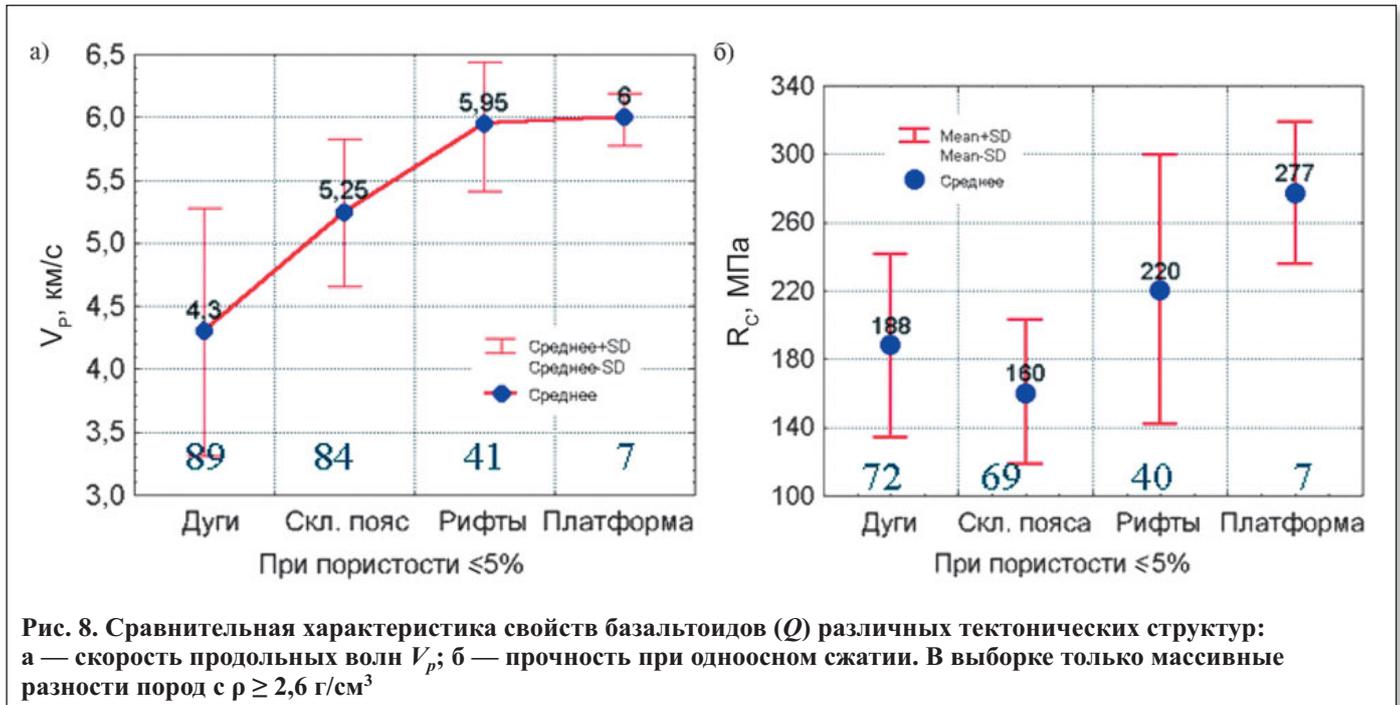
и обуславливает аномально низкие значения V_p (рис. 5). В дальнейшем эта гипотеза подтвердилась на других объектах и получила доказательства как в виде ряда голоценовых образцов из разных регионов с низкими значениями V_p , так и в виде фотографий микротрещин в породе. Еще одной особенностью голоценовых эффузивов является отсутствие корреляции между скоростью упругих волн и пористостью (плотностью) (рис. 6, а).

С течением времени (более 100 000 лет, временная граница может различаться для разных регионов) микротрещины смыкаются и исчезают, в связи с чем значения V_p заметно повышаются — до 4–5 км/с (рис. 6, б). Кроме того, вместо неопределенного облака на графике плотность — скорость V_p для голоценовых базальтов (выбраны только массивные образцы с плотностью более 2,6 г/см³) (см. рис. 6, а), для эффузивов Q₂₋₃ и Q₁ наблюдается вполне четкая тенденция повышения V_p с увеличением плотности (см. рис. 6, б).

Таким образом, низкие значения V_p и отсутствие их корреляции с плотностью (пористостью) вполне определенно указывают на молодой (голоценовый) возраст исследованных пород и поэтому могут быть использованы при возрастном расчленении вулканических толщ.

Таблица 4

Структурно-минералогические особенности и средние значения показателей физико-механических свойств эффузивных пород (Q) различных тектонических структур				
Современная геотектоническая обстановка	Срединно-океанические хребты	Платформы	Складчатые пояса	Активные окраины островодужного типа
Условия извержения	Подводные	Подводные и наземные	Наземные	Наземные
Петрохимический тип	Нормальной щелочности	Субщелочные	Нормальной щелочности	
	Толеитовые		Известково-щелочные	
Минеральный состав	Пироксен Плагиоклаз Оливин Вулканическое стекло	Оливин Клинопироксен Плагиоклаз Вулканическое стекло (60–80%)	Плагиоклаз Клино- и ортопироксен Оливин (во вкрапленниках) Вулканическое стекло (0–80%)	
Преобладающие типы структуры основной массы	Метельчатые Гиалопилитовые Офитовые	Гиалопилитовые Витрофирровые	Офитовые Интерсертальные Гиалопилитовые	Интерсертальные Гиалопилитовые Офитовые
Пористость, %	13,8	15,6	10,5	15,5
Плотность твердых частиц, г/см ³	3,0	3,01	2,87	2,88
Скорость распространения продольных волн, км/с	5,15	5,2	4,8	3,6
Прочность на одноосное сжатие, МПа	188	179	120	107
Магнитная восприимчивость, *10 ⁻³ СИ	2,9	2,4	7,5	8,4
Районы исследований	Красноморский рифт, район острова Буве, впадина Хесса	Остров Шпицберген (Баренцева платформа)	Малый Кавказ, Италия	Курило-Камчатский регион, Новозеландская, Марианская, Соломонова островные дуги
Количество образцов	288	123	418	983



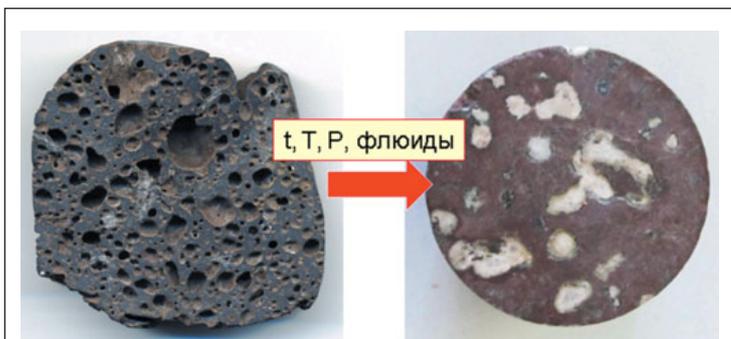


Рис. 10. Образование миндалекаменной текстуры в метавулканитах: заполнение пор вторичными минералами под действием флюидов.
t — время, *T* — температура, *P* — давление

Прочность. Одной из важнейших характеристик физико-механических свойств пород является их прочность. Взаимосвязь этой величины с пористостью (плотностью) породы не вызывает сомнения, но возникает вопрос о том, как они взаимосвязаны. Как видно из графика, эта зависимость для эффузивных пород достаточно четкая (рис. 7). На графике выделяются три участка. На первом участке в интервале плотности от 1,0 до 2,0 г/см³ величина плотности изменяется в очень широких пределах, тогда как прочность — всего на 40 МПа. Здесь прочность целиком зависит от пористости, и рост ее значений происходит

очень медленно. На втором участке плотность меняется в интервале 2,0–2,5 г/см³, а прочность возрастает на 100 МПа. На третьем участке плотность возрастает с 2,5 до 3,0 г/см³, прочность растет на 130 МПа (в интервале 150–280 МПа). Для плотных пород (с низкой пористостью) влияние пористости на прочность снижается, тогда как возрастает влияние минерального состава и структуры породы.

Инженерно-геологические особенности эффузивов различных тектонических структур. Различаются ли по свойствам эффузивы, сформированные в различных тектонических структурах? Чтобы ответить на этот вопрос, были исследованы образцы из различных тектонических структур Земли — океанов, островных дуг, складчатых поясов, платформенных областей. Для исключения влияния пористости были выбраны только массивные разновидности с пористостью менее 5%. Как видно, эффузивы различных тектонических структур заметно отличаются друг от друга по свойствам (рис. 8), в то время как эффузивы одной тектонической структуры близки между собой (рис. 9). Эффузивы каждой тектонической структуры имеют свои особенности химического и минерального состава, структурных характеристик, что отражается на их физико-механических свойствах (табл. 4). Интерпретация результатов требует дополнительного, более тщательного анализа — в первую очередь структурно-минералогического и текстурного.

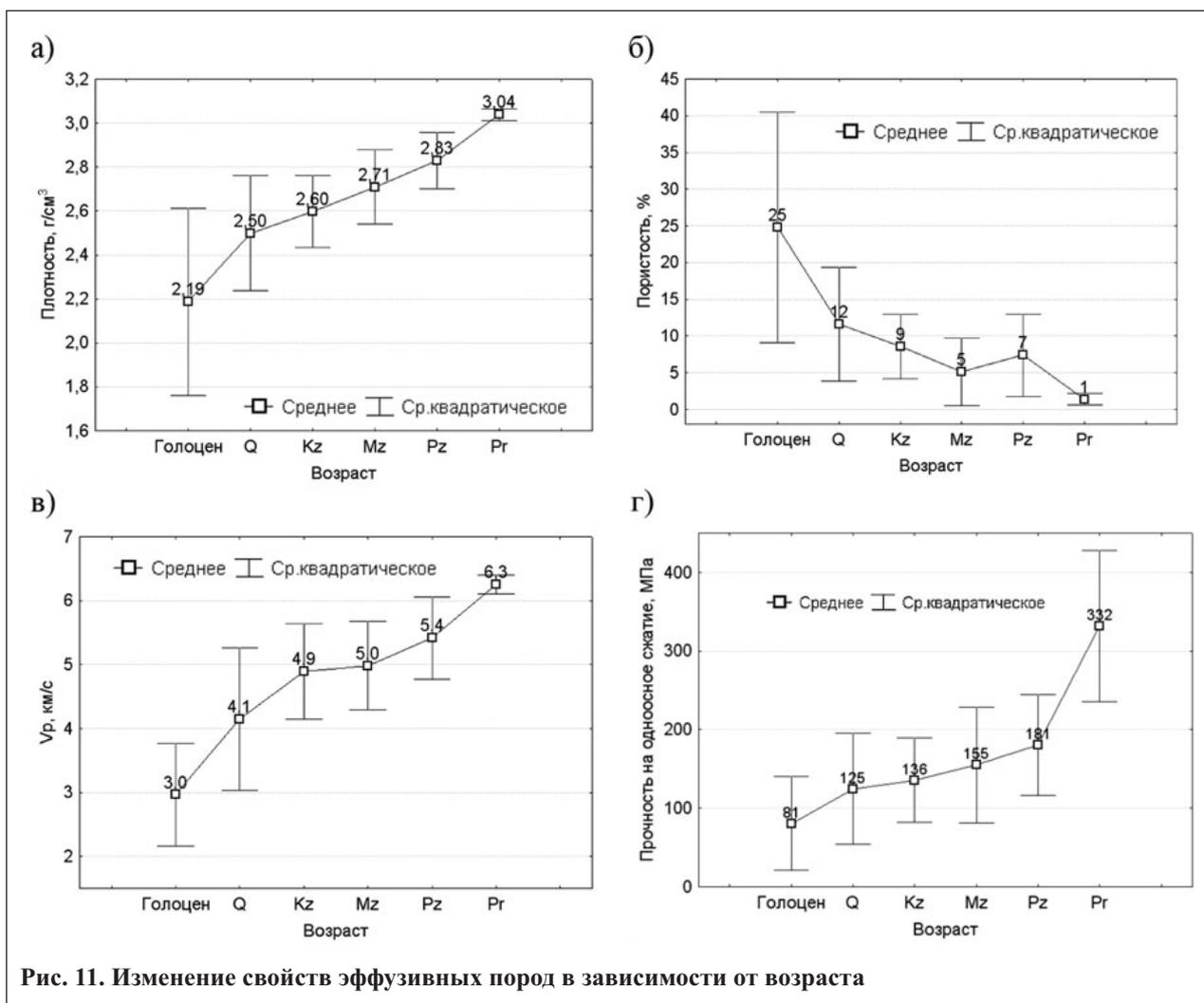


Рис. 11. Изменение свойств эффузивных пород в зависимости от возраста

Изменение свойств эффузивных пород при низкоградном метаморфизме

Что происходит в дальнейшем с эффузивами? С течением времени в ходе тектонического развития (возможно, под действием веса образовавшихся эффузивных пород вместе с внедрившимися пластовыми магматическими образованиями) территория испытывает погружение, и вулканогенные толщи подвергаются воздействию температуры, давления и горячих флюидов. В результате такого воздействия породы испытывают значительные преобразования, отражающиеся на их составе, текстуре и свойствах. В первую очередь происходит заполнение открытых пор вторичными минералами с формированием миндалекаменных текстур (рис. 10), сопровождающееся резким снижением пористости до первых процентов и, соответственно, повышением значений физико-механических свойств пород.

При более глубоких метаморфических изменениях эффузивов наблюдается замещение первичных магматических минералов вторичными новообразованиями (хлорит, корренсит, гидрослюда, смектиты, карбонаты, кварц, халцедон, альбит, адуляр, цеолиты, пренит, пумпеллиит, эпидот, клиноцоизит, пирит, сфен и др.), то есть образуются новые породы — метавулканиты, характеризующиеся иным составом, другим типом сростания минералов, вторичными структурами и текстурами. Параллельно изменяются и свойства пород, преимущественно в сторону повышения (рис. 11), хотя в ряде случаев отмечается и снижение значений, поскольку степень преобразования пород и состав вторичных минералов в разных зонах метаморфизма различны.

Выводы

1. Выявлено два основных отличия четвертичных и некоторых плиоценовых эффузивов от более древ-

них: 1) открытая пористая текстура, самая разнообразная как по размерам пор, так и по их морфологии; 2) неизменность первичных минералов.

2. Важной инженерно-геологической особенностью большинства современных эффузивов являются аномально низкие значения скорости продольных волн ($V_p = 2,0-4,5$ км/с), что обусловлено микротрещиноватостью, образующейся при застывании и кристаллизации лавы.

3. Отмечено увеличение пористости у голоценовых эффузивов по сравнению с плейстоценовыми, что может быть связано с повышением выбросов вулканических газов в атмосферу в настоящее время.

4. В древних эффузивах все открытые поры заполняются вторичными минералами, формируется миндалекаменная текстура. Исчезает первичная открытая видимая пористость, создается новая вторичная система пористости как по размерам пор, так и по морфологии. Первичные минералы и вулканическое стекло замещаются вторичными, с иными свойствами. Нарушаются кристаллизационные связи между первичными магматическими минералами, изменяется характер и сила взаимодействия между минералами, что закономерно отражается на свойствах пород.

5. В классификации скальных грунтов подгруппу эффузивных пород необходимо разделить на две части: неоген-четвертичные неизменные эффузивы с пористой текстурой и более древние (от неогена до архея) метавулканиты с миндалекаменной текстурой.

В заключение отметим, что исследования эффузивных пород продолжаются, постоянно добавляются новые данные, которые могут несколько изменить цифры, но не меняют основных выводов. 

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-05-00501а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голодковская Г.А., Кривошеева З.А., Ладыгин В.М. и др. Влияние тектоно-магматической истории развития Малого Кавказа на инженерно-геологические свойства базальтоидов // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения». М.: ГЕОС, 2001. С. 154–159.
2. ГОСТ 21153.0-84. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1984. 35 с.
3. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1984. 12 с.
4. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. М.: Изд-во стандартов, 1984. 35 с.
5. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1984. 17 с.
6. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
7. Ладыгин В.М. Петрогенетические закономерности формирования и изменения свойств четвертичных эффузивов основного-среднего состава // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения». М.: РУДН, 2014. Вып. 16. С. 43–48.
8. Ладыгин В.М., Никитин В.Н. О некоторых особенностях свойств молодых эффузивов Камчатки // Вестник Моск. унта. Серия 4. Геология. 1980. № 5. С. 81–86.
9. Ладыгин В.М., Соколов В.Н., Спиридонов Э.М. и др. Новые данные о поровом пространстве в четвертичных базальтах в различных геодинамических обстановках // Материалы XIX ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», г. Петропавловск-Камчатский, Россия. 29–30 марта 2016. С. 114–118.