

ВЛИЯНИЕ МИКРОТРЕЩИНОВАТОСТИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГРАНИТОИДОВ АЛДАНСКОГО ЩИТА

INFLUENCE OF MICROFRACTURING ON STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF GRANITOIDS OF THE ALDAN SHIELD

ЕФРЕМОВ В.В.

Студент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, vve1994@gmail.com

ФРОЛОВА Ю.В.

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

EFREMOV V.V.

Student of the Engineering and Ecological Geology Department of the Geology Faculty of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, vve1994@gmail.com

FROLOVA Ju.V.

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

Ключевые слова:

микротрещиноватость; гранитоиды; прочность на одноосное сжатие; динамический модуль упругости; статический модуль упругости; деформационная кривая; коэффициент трещинной пустотности; остаточная деформация.

Key words:

microfracturing (microjointing); granitoids; uniaxial compression strength; dynamic elasticity modulus; static elasticity modulus; deformational curve; joint hollowness coefficient; permanent (residual) deformation.

Аннотация

В статье рассмотрено влияние микротрещиноватости на физико-механические свойства образцов гранитоидов Алданского щита. Для количественной оценки микротрещиноватости использован коэффициент трещинной пустотности, определяемый тремя способами — по макрофотографиям аншлифов и по микрофотографиям, сделанным под оптическим микроскопом в отраженном и во флуоресцентном свете. Получены зависимости прочностных и деформационных характеристик образцов от степени микротрещиноватости. Показано, что микротрещиноватость влияет на тип деформационной кривой, получаемой при статическом нагружении образца. Установлена зависимость между прочностью на одноосное сжатие и остаточной деформацией.

Введение

Трещиноватость является неотъемлемой особенностью любых горных пород и их массивов. Трещины возникают вместе с горной породой, существуют и изменяются в ней на протяжении всей ее истории. В инженерной геологии изучению трещиноватости уделяется особое внимание, поскольку она в большой степени определяет физико-механические и фильтрационные свойства горных пород и поведение скальных массивов при взаимодействии с инженерными сооружениями [12].

Влияние трещиноватости на физико-механические свойства горных пород достаточно хорошо изучено на уровне скального массива [1, 2, 7, 13, 17], но лишь отдельные статьи посвящены зависимости от нее свойств образцов. В частности, в работе [7] исследовалась зависимость прочности различных пород от дефектов их структуры, к которым относятся трещины различных масштабных уровней. Показано, что прочность породы в образце снижается в основном за счет ультра-, микро- и мезотрещин, а макро- и мегатрещины определяют прочность массива пород.

В работе [2] для пород Талнахского месторождения (север Красноярского края) установлена взаимосвязь между коэффициентом трещинной пустотности ($K_{тп}$) и прочностью: с увеличением $K_{тп}$ с 2 до 7–8% прочность на одноосное сжатие и скорости упругих волн снижаются в 2–3 раза, причем для пород с сильной тектонической трещиноватостью затушевываются первичные различия в их свойствах, обусловленные их генезисом.

Сильное влияние на прочность оказывает ориентировка трещин по отношению к направлению прилагаемой нагрузки. Наименьшее значение прочности характерно для случая, когда ориентировка трещины совпа-

Abstract

The paper considers influence of microfracturing (microjointing) on strength and deformation properties of granitoids from the Aldan shield. For quantitative assessment of microfracturing the joint hollowness coefficient is used. This coefficient was determined by three ways using macrophotographs of polished sections and microphotographs obtained with an optical microscope by reflected light and by fluorescent light. Dependences of the strength and deformation characteristics of the samples on the microjointing degree were obtained. The paper shows that microfracturing influences on the type of a deformational curve of static loading. Relationship between the uniaxial compression strength and permanent (residual) deformation is revealed.

дает с углом наклона конуса, по которому в образце возникают максимальные касательные напряжения при одноосном сжатии [7].

Помимо интенсивности трещиноватости и ориентировки трещин на прочностные свойства породы влияет характер заполнителя трещин.

В работе [4] рассматривается влияние микротрещиноватости на физико-механические свойства интрузивных, метаморфических и метасоматических пород Любавинского месторождения (Читинская область). При увеличении степени трещиноватости от слабой ($K_{тр} < 2\%$) до сильной и очень сильной ($K_{тр} > 10\%$) прочность на одноосное сжатие и статический модуль упругости снижаются приблизительно в 3 раза. Кроме того, установлено, что при деформировании слаботрещиноватых образцов преобладают упругие деформации, тогда как в сильнотрещиноватых породах развиваются значительные остаточные деформации.

Японские ученые из университета Киото исследовали механизм формирования и роста трещин в образцах гранитов в зависимости от прикладываемой к ним нагрузки [16]. Для визуализации процесса трещинообразования в процессе нагружения они использовали томограф и таким образом прослеживали закономерности формирования и развития микротрещин.

В данной работе рассматривается влияние микротрещиноватости на прочностные и деформационные свойства образцов гранитоидов с Алданского щита (юго-восток Средней Сибири, Якутия). Под микротрещиноватостью авторы понимают совокупность ультра-, микро- и мезотрещин.

Следует подчеркнуть, что речь здесь пойдет только о лабораторных исследованиях микротрещиноватости на уровне образцов горных пород, а не о трещиноватости массива (макро- и мегатрещинах).

Методы исследований

Проводились исследования микротрещиноватости и физико-механических свойств восьми образцов гранитов и гранодиоритов цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру 2:1 согласно стандартам и пособиям [3, 9, 11, 14].

Деформационные свойства образцов определялись двумя методами — динамическим и статическим.

Плотность твердой фазы ρ определялась аналитиком М.В. Коптевой-Дворниковой на приборе ПЭЛА-2 (разработанном В.Я. Калачевым на кафедре инженерной и экологической геологии МГУ). Скорости продольных и поперечных волн в образцах (V_p и V_s соответственно) измерялись с помощью прибора «Ультразвук» (производства компании «ЭкогеосПром») с частотой датчиков 250 кГц. Коэффициент Пуассона μ_d и динамический модуль упругости E_d рассчитывались по скоростям ультразвуковых волн по формулам:

$$\mu_d = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}; \quad (1)$$

$$E_d = \frac{V_p^2 \rho (1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d}. \quad (2)$$

Определение деформационных характеристик при одноосном сжатии было основано на измерении продольных и поперечных деформаций при непрерывном нагружении образца с постоянной скоростью. Испытания проводились с максимальным усилием 1 500 кН на гидравлическом полуавтоматическом прессе Controls (производства компании Controls) с измерительным модулем управления и контроля. Для регистрации деформаций использовалось 8-канальное измерительное устройство Datalog (производства той же компании). Измерения деформаций в ходе эксперимента осуществлялись с помощью потенциометрических датчиков линейного перемещения WF 17006 (производства той же компании). Точность измерения составляла 0,001 мм. Продольная деформация регистрировалась одним датчиком, поперечная — двумя (для расчетов бралась средняя величина).

Испытание заключалось в нагружении образца с постоянной скоростью (около 1 кН/с) до нагрузки, не превышавшей (в соответствии с ГОСТ 28985–91) 50–60% от максимального разрушающего усилия. Далее производилась разгрузка. В процессе нагружения и разгрузки образца регистрировались абсолютные деформации (отсчеты снимались каждую секунду).

По результатам испытаний были построены деформационные кривые в координатах «напряжение — относительная деформация». По ветви нагрузки рассчитывались общий модуль деформации и коэффициент поперечного расширения, по ветви разгрузки — модуль упругости и коэффициент Пуассона [11].

Изучение микротрещиноватости проводилось с помощью аншлифов. Каждый аншлиф исследовался тремя способами — по макрофотографии и по микрофотографиям, сделанным под оптическим микроскопом в отраженном (рис. 1) и во флуоресцентном (рис. 2) свете.

Сначала аншлифы просматривали под оптическим микроскопом Olympus-BX 41 (производства компании Olympus) в отраженном свете, после чего они были насыщены люминофором и исследованы во флуоресцентном свете. На полученных фотографических изображениях поверхности аншлифов при помощи программы Image Score (разработки компании ScorePhoto Image Software) оконтуривались микротрещины. Далее рассчитывался коэффициент трещинной пустотности $K_{тр}$ по формуле:

$$K_{тр} = \frac{S_{тр}}{S} \times 100\%, \quad (3)$$

где $S_{тр}$ — суммарная площадь трещин на исследуемой поверхности; S — площадь образца.

Следует отметить, что в исследованных гранитоидах встречались как открытые микротрещины, так и с заполнителем. Большинство микротрещин были открытыми, а среди мезотрещин чаще встречались залеченные, причем заполнителем, как правило, являлся кварц. При расчете коэффициента трещинной пустотности учитывались оба вида трещин, т.к. при испытаниях на одноосное сжатие образцы в некоторых случаях разрушались и по залеченным трещинам.

Помимо микрофотографий для аналогичного расчета коэффициента трещинной пустотности использовались макрофотографии аншлифов.

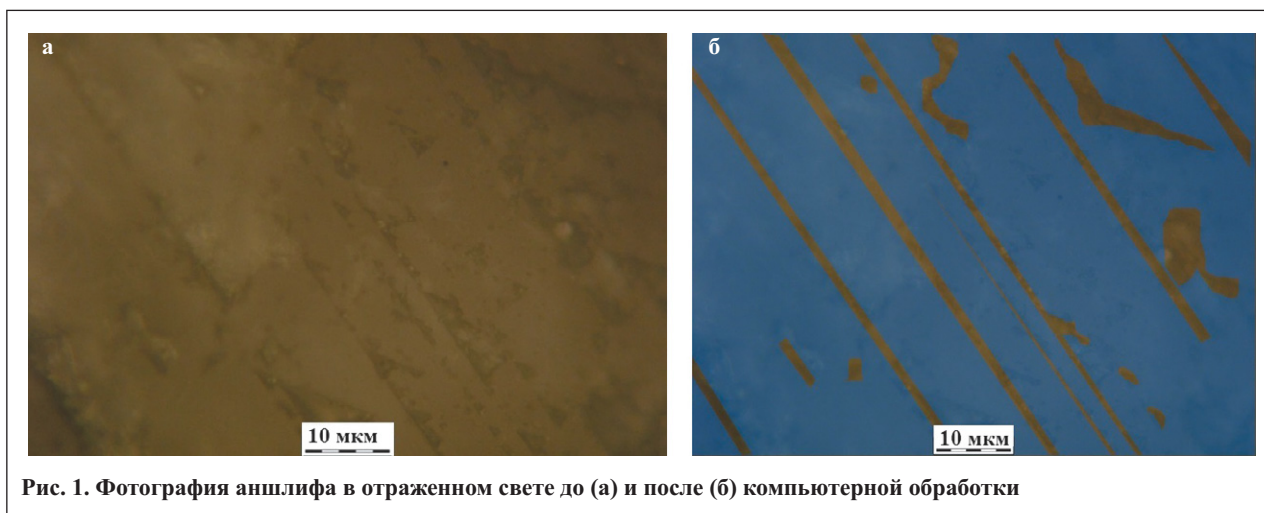


Рис. 1. Фотография аншлифа в отраженном свете до (а) и после (б) компьютерной обработки

Петрографический состав пород исследовался с помощью просматривания шлифов под оптическим микроскопом в проходящем свете.

Результаты петрографического исследования

Исследованные породы представлены гранитами и гранодиоритами. Среди первых выявлено несколько разновидностей — биотитовый, мусковитовый, пироксеновый и калишпатовый гранит (рис. 3, а–г, е, з).

Основные породообразующие минералы исследованных гранитов — калиевый полевой шпат (КПШ), плагиоклаз, кварц, биотит, мусковит. В меньшем количестве присутствуют роговая обманка и пироксены. Содержание рудных минералов составляет 1–7%. Среди вторичных преобразований отмечается пелитизация по КПШ, серицитизация по плагиоклазу (рис. 4), хлоритизация по биотиту, частичное замещение пироксенов эпидотом и хлоритом.

По набору основных породообразующих минералов исследованные гранодиориты в целом аналогичны гранитам. Различия заключаются в их количественном содержании (см. рис. 3, д, ж). Гранодиориты характеризуются меньшим содержанием кварца и большим количеством амфиболов и пироксенов. Среди вторичных преобразований, как и в гранитах, отмечается пелитизация по КПШ и серицитизация по плагиоклазу.

Результаты изучения микротрещиноватости

По результатам макроописания образцов и микроописания аншлифов по классификации, приведенной в работе [6], выделено два типа трещин — микротрещины (длиной до 1 см) и мезотрещины (длиной более 1 см). По генезису различаются трещины тектонической природы (рис. 5, а) и первичные петрогенетические (рис. 5, б).

По результатам вычисления коэффициента трещиноватости на макро- и микроуровнях составлена табл. 1. Сопоставляя данные о микротрещиноватости, полученные на разных масштабных уровнях, можно увидеть, что величины $K_{тп}$, полученные при исследовании аншлифов, насыщенных люминофором, существенно выше. Действительно, во флуоресцентном свете микротрещины проявляются более четко. По данным же, полученным на макроуровне, можно охарактеризовать лишь отдельные участки, в первую очередь трещиноватые кристаллы, но нельзя судить о микротрещиноватости породы в целом. Например, высокие значения $K_{тп}$ для образцов № 35 (21,7%) и № 73 (23%) характеризуют не общую микротрещиноватость породы, а отдельный сильнотрещиноватый кристалл, как это хорошо видно на рис. 5, б.

Анализ полученных результатов

Полученные физические и физико-механические характеристики исследованных образцов приведены

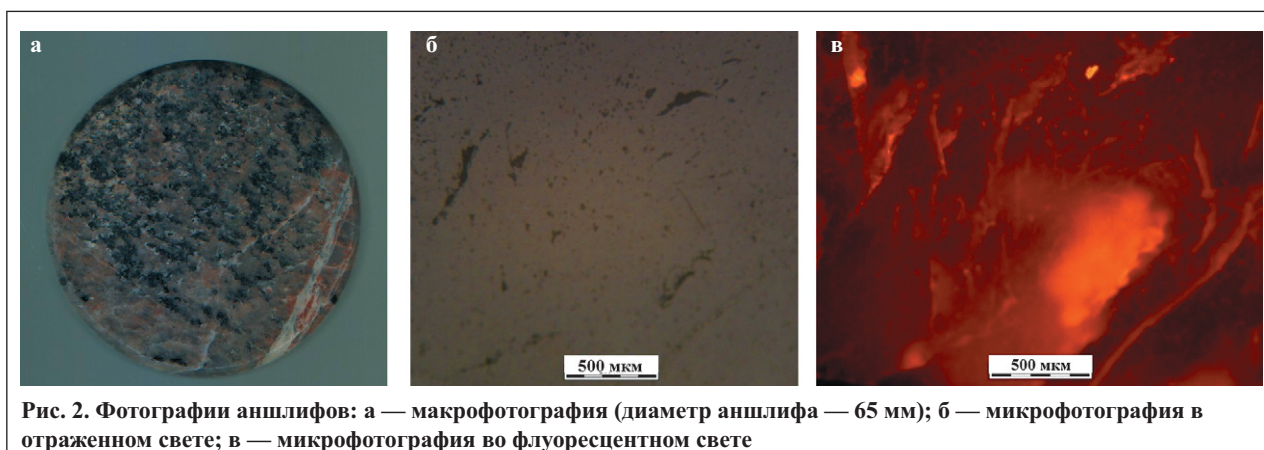


Рис. 2. Фотографии аншлифов: а — макрофотография (диаметр аншлифа — 65 мм); б — микрофотография в отраженном свете; в — микрофотография во флуоресцентном свете

в табл. 2. Большинство из них имеют близкие значения плотности, меняющиеся в интервале 2,63–2,68 г/см³ (при этом пористость меняется в диапазоне 2,7–5,2%). Поэтому можно предположить, что основ-

ным фактором, влияющим на их прочностные и деформационные свойства, является микротрещиноватость. Два образца гранодиоритов (№ 69 и 72) отличаются более высокой плотностью (2,76–2,79 г/см³)

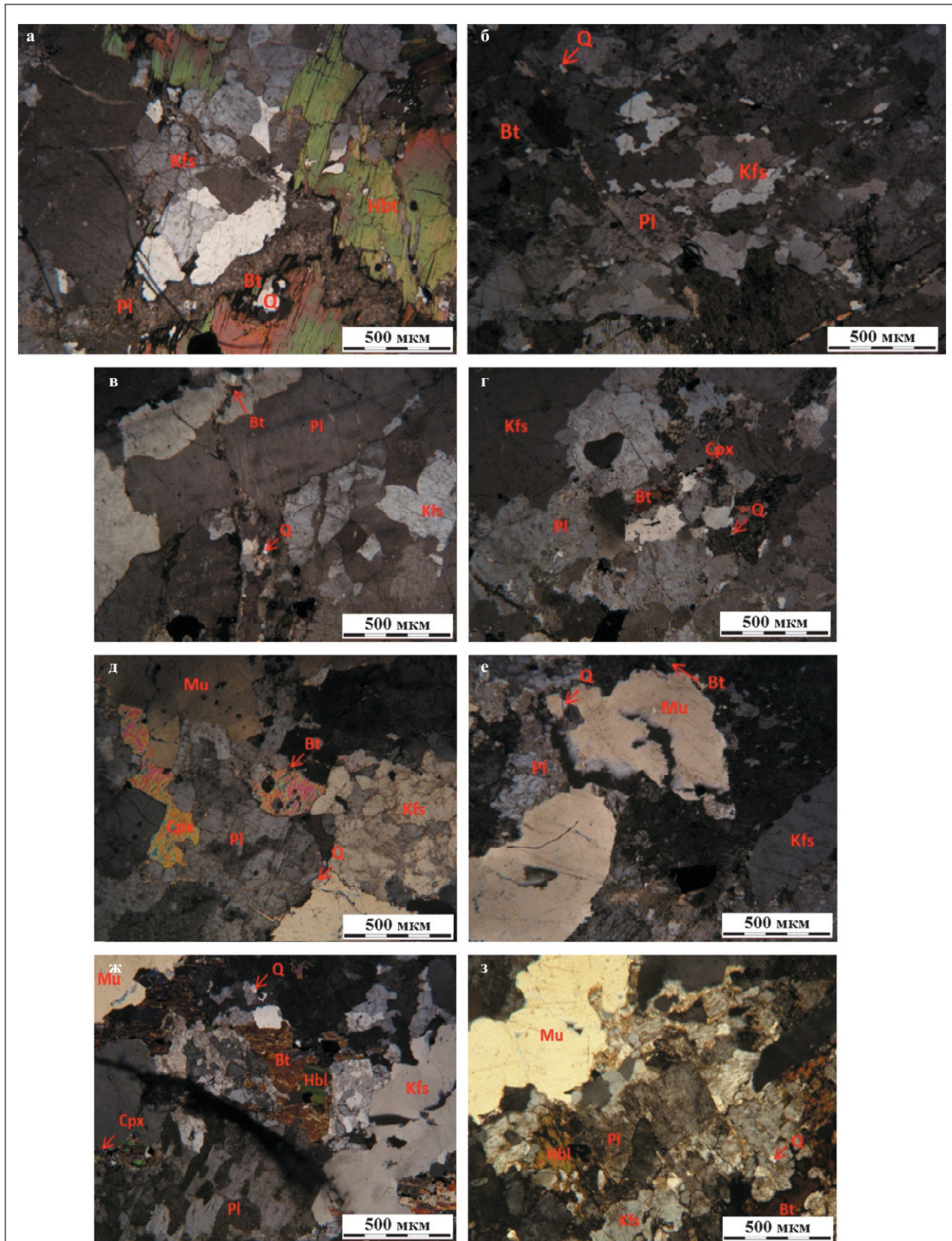


Рис. 3. Фотографии шлифов гранитоидов при скрещенных николях: а — биотитовый гранит (образец 33); б — калищатовый гранит (обр. 35); в — калищатовый гранит (обр. 42); г — пироксеновый гранит (обр. 47); д — гранодиорит (обр. 69); е — мусковитовый гранит (обр. 71); ж — гранодиорит (обр. 72); з — мусковитовый гранит (обр. 73). Условные обозначения: Mu — мусковит; Q — кварц; Kfs — калиевый полевой шпат; Pl — плагиоклаз; Bt — биотит; Срх — клинопироксен; Hbl — роговая обманка



Рис. 4. Вторичные преобразования гранитов: а — серицитизация плагиоклаза (при скрещенных николях); б — пелитизация полевых шпатов (при параллельных николях)



Рис. 5. Микрофотографии аншлифов в отраженном свете: а — трещина тектонической природы, пересекающая весь образец; б — трещиноватый кристалл калиевого полевого шпата

за счет повышенного по сравнению с гранитами содержания темноцветных минералов.

Деформационные свойства

Как видно из табл. 2, динамический модуль упругости E_d не имеет явной зависимости от плотности, однако прослеживается некоторая его зависимость от минерального состава. В частности, пироксеновый и биотитовый граниты отличаются более высокими значениями E_d (84,5 и 76,5 ГПа соответственно) по

сравнению с калишпатовыми и мусковитовыми разновидностями.

Выявлена зависимость между коэффициентом трещинной пустотности и динамическим модулем упругости. Как видно по графику, представленному на рис. 6, чем выше значение $K_{тп}$, тем меньше величина E_d .

Обнаружена существенная разница между значениями статического модуля упругости $E_{ст}$ для гранитов и гранодиоритов (см. табл. 2). У гранитов они

Таблица 1

Значения коэффициентов трещинной пустотности $K_{тп}$ для исследованных образцов				
№ образца	Порода	$K_{тп}$, %, по результатам исследования аншлифа		
		по макрофотографии	по микрофотографии	
			в отраженном свете	в люминесцентном свете
33	Биотитовый гранит	7	2	11
69	Гранодиорит	11	6	14
72	Гранодиорит	8	1	9
35	Калишпатовый гранит	4	12	22
42	Калишпатовый гранит	14	4	11
47	Пироксеновый гранит	1	5	13
71	Мусковитовый гранит	9	10	14
73	Мусковитовый гранит	9	17	23

Физические и физико-механические характеристики исследованных образцов*							
Порода	№ образца	ρ , г/см ³	n , %	E_d , ГПа	$E_{ст}$, ГПа	R_c , МПа	
Гранодиориты	69	2,76	3	59,88	12,5	78	
	72	2,79	1	58,29	15,0	119	
Граниты	калишпатовый	35	2,67	3	68,15	27,7	158
		42	2,68	1	56,50	23,1	59
	биотитовый	33	2,68	4	76,46	31,9	114
	пироксеновый	47	2,67	7	84,45	30,6	163
	мусковитовый	71	2,66	5	51,61	25,0	81
		73	2,63	3	57,40	17,6	90

* ρ — плотность воздушно-сухого грунта; n — пористость; E_d — динамический модуль упругости; $E_{ст}$ — статический модуль упругости; R_c — предел прочности грунта на одноосное сжатие

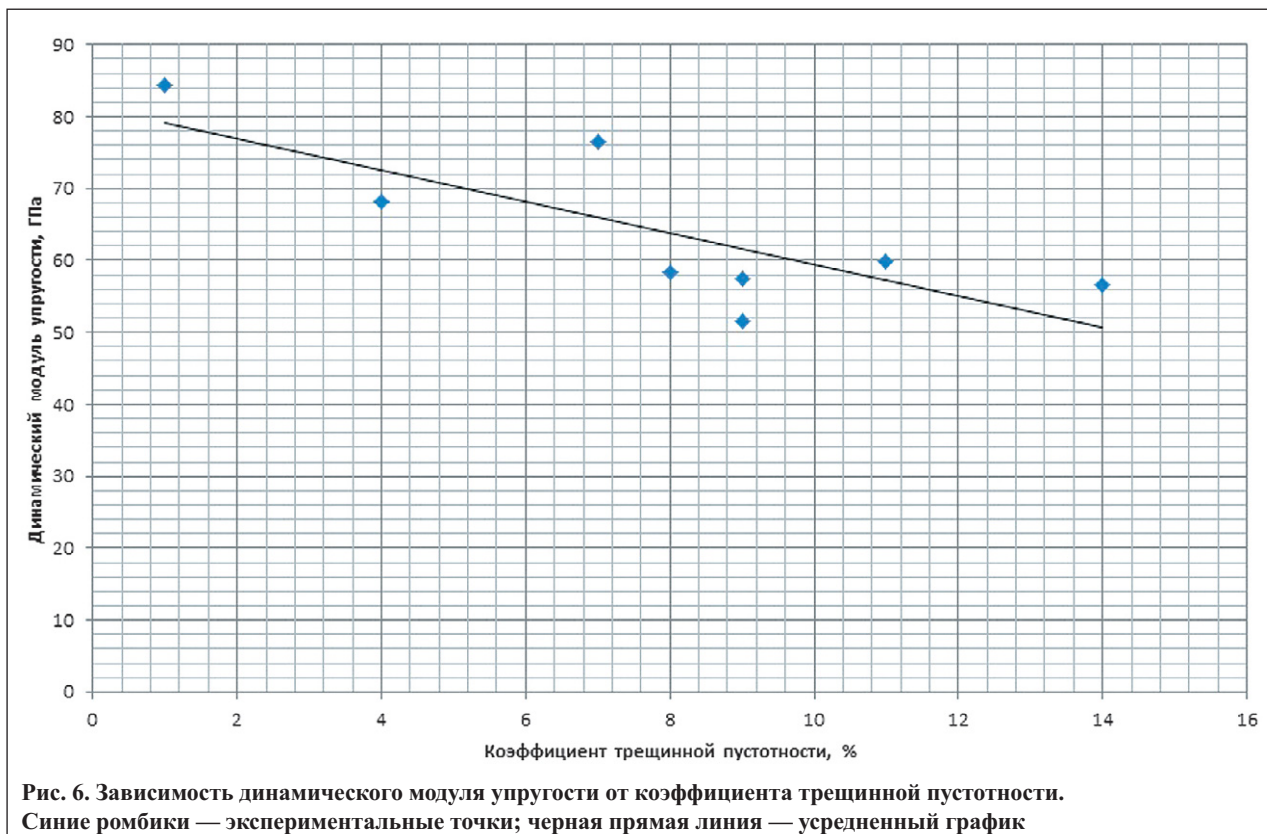
больше, чем у гранодиоритов (20–30 и 12–15 ГПа соответственно), хотя по теоретическим соображениям должно быть наоборот. Отсюда можно сделать вывод, что минеральный состав не влияет на статический модуль упругости, что подтверждается недавно опубликованной статьей испанских ученых [15]. По-видимому, эта разница в модулях упругости обусловлена повышенной трещиноватостью гранодиоритов, причем влияние на деформационные свойства оказывает не только интенсивность трещиноватости, но и ориентация трещин в образце.

Общая тенденция влияния микротрещиноватости на статический модуль упругости отражена на рис. 7: при наличии мезотрещин значения $E_{ст}$ резко уменьшаются

по сравнению с величинами этого модуля в образцах, в которых присутствуют только микротрещины.

Также была выявлена зависимость между коэффициентом трещинной пустотности и статическим модулем упругости. Как видно по графику, представленному на рис. 8, в целом наблюдается тенденция к снижению величин $E_{ст}$ при повышении значений $K_{тр}$.

При анализе деформационных кривых было выявлено следующее. Как известно, деформирование скальных грунтов представляет собой сложный физический процесс, в котором обычно выделяют несколько стадий [1]. Процесс этот в целом нелинейный и зависит от различных факторов. По графикам зависимости относительной продольной деформации от напряжения,



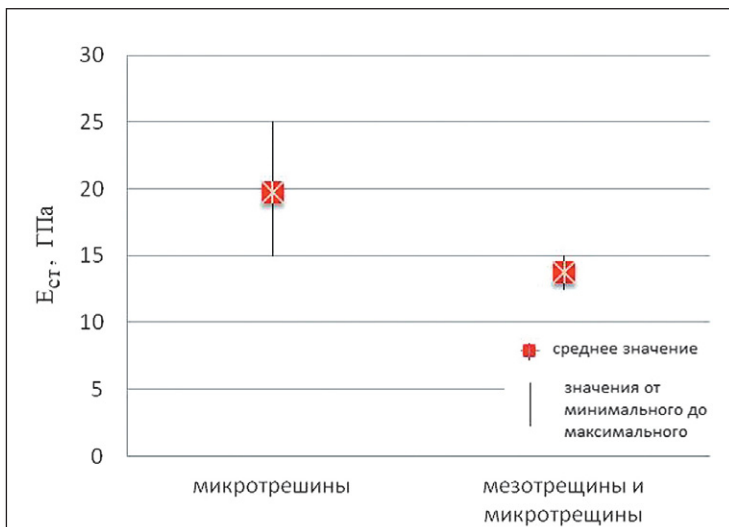


Рис. 7. Влияние микро-трещиноватости гранитоидов на статический модуль упругости $E_{ст}$

полученным при одноосном нагружении образцов, можно проследить характер деформирования породы. Выделяются два типа кривых.

Первый тип характеризуется существенным расхождением ветвей нагрузки и разгрузки (обр. № 69, 72, рис. 9, а). Например, для образца № 69 модуль упругой деформации равен $1,25 \times 10^4$ МПа, а общей деформации — $1,00 \times 10^4$ МПа. Для образца № 72 они составляют $1,50 \times 10^4$ МПа и $1,24 \times 10^4$ МПа соответственно.

У второго типа кривых линии нагрузки и разгрузки практически совпадают (обр. № 71, 73, рис. 9, б), что свидетельствует о преобладании упругих деформаций. Для образца № 71 модуль упругой деформации составляет $2,50 \times 10^4$ МПа, а общей деформации — $2,24 \times 10^4$ МПа. Для образца № 73 они равны $1,76 \times 10^4$ МПа и $1,50 \times 10^4$ МПа соответственно.

Анализ полученных данных показал, что первый тип деформационной кривой (см. рис. 9, а) характерен для образцов с мезотрещинами, тогда как второй тип (см. рис. 9, б) свойственен образцам без видимых мезотрещин (при близких значениях $K_{тр}$, составляющих около 10%). При этом для образцов первого типа характерны меньшие упругие деформации.

Из этого можно сделать вывод, что при наличии мезотрещин в образце возникают значительные необратимые деформации, тогда как образцы только с микро-трещинами могут деформироваться упруго, т.е. восстанавливаться после снятия нагрузки.

Рассмотрим *связь динамического и статического модулей упругости*. В нормативных документах [10] и работах [8, 13] приводится ряд формул для пересчета динамических показателей деформационных свойств в статические. Однако единой зависимости между двумя указанными модулями нет — разными авторами предлагаются разные уравнения.

На рисунке 10 показана зависимость между $E_{ст}$ и $E_{д}$, полученная для исследованных авторами образцов гранитоидов. На графике выделяются два участка. Первый можно аппроксимировать прямой, практически параллельной оси абсцисс (т.е. зависимость практически отсутствует). Этот участок соответствует гранодиоритам и мусковитовым гранитам. Такая слабая зависимость между модулями может быть обусловлена масштабным эффектом и малым числом точек на графике. На втором участке графика между модулями наблюдается прямо пропорциональная зависимость, причем динамический модуль в 2,5–3 раза выше статического.

Прочностные свойства

В результате сопоставления полученных значений прочности на одноосное сжатие и данных по микро-трещиноватости между ними выявлена зависимость.

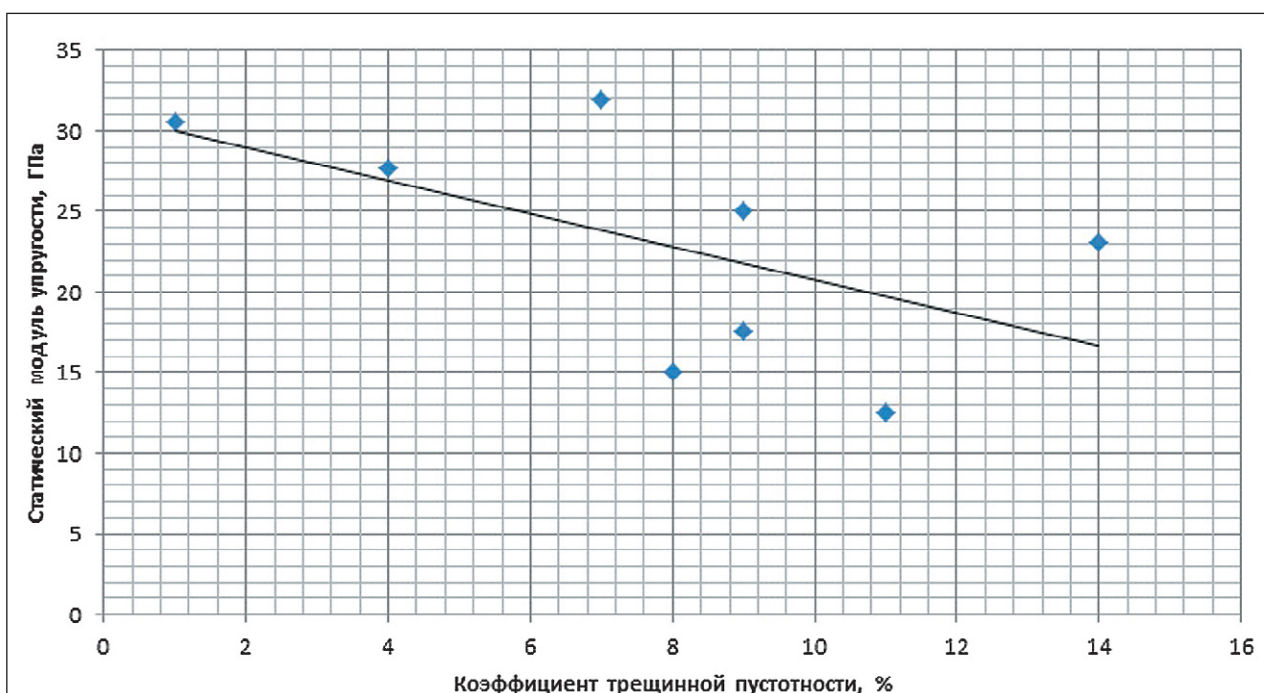


Рис. 8. Зависимость статического модуля упругости от коэффициента трещинной пустотности. Синие ромбы — экспериментальные точки; черная прямая линия — усредненный график

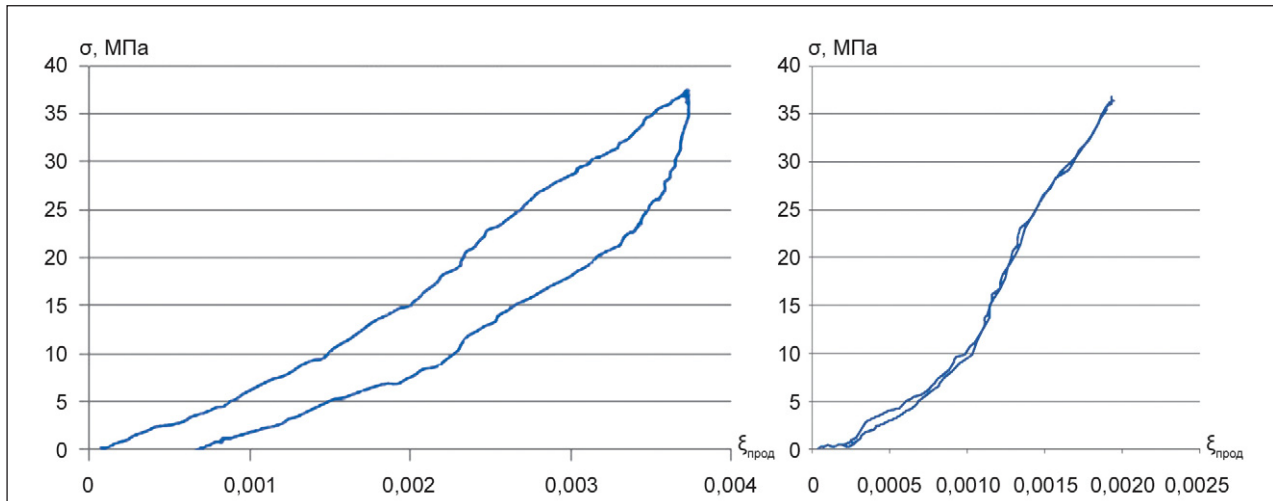


Рис. 9. Деформационные кривые гранитоидов: а — ветви нагрузки и разгрузки существенно расходятся (обр. № 69, 72); б — линии нагрузки и разгрузки практически совпадают (обр. № 71, 73). Условные обозначения: σ — напряжение; $\xi_{\text{прод}}$ — относительная продольная деформация

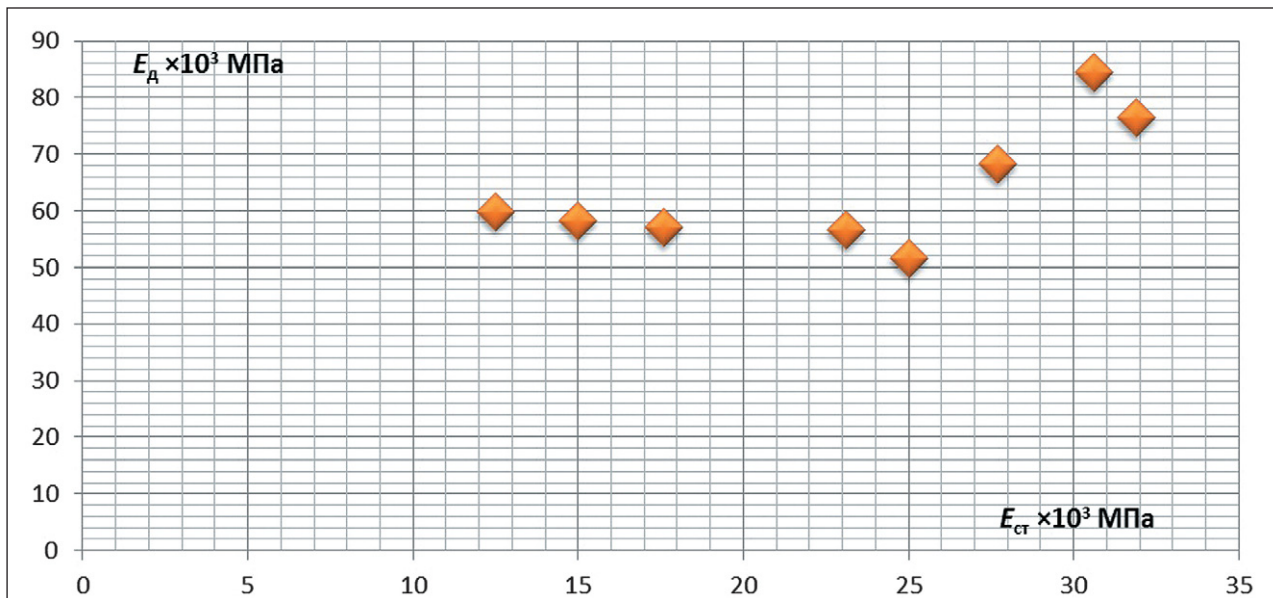


Рис. 10. Взаимосвязь между статическим и динамическим модулями упругости. Оранжевые ромбики — экспериментальные точки

Прочность образцов с мезотрещинами меньше, чем у образцов, в которых присутствуют только микротрещины (рис. 11). Это объясняется тем, что микротрещины ориентированы хаотично и им сложнее объединиться в единую магистральную трещину, отвечающую за разрушение.

Также была выявлена зависимость между коэффициентом трещинной пустотности и прочностью на одноосное сжатие. Как видно по графику, представленному на рис. 12, чем выше $K_{\text{тп}}$, тем меньше прочность. В частности, при увеличении $K_{\text{тп}}$ с 1 до 14% прочность на одноосное сжатие снижается со 160 до 60 МПа.

Как известно, хрупкое разрушение образца происходит в результате образования магистральной трещины, которая формируется при объединении микротрещин, возникающих при нагружении образца. Согласно книге [5] условие объединения трещин называется критерием разрушения. Он должен устанавливать связь между критической длиной трещины и величиной внешней нагрузки, при которой начинается рост трещины.

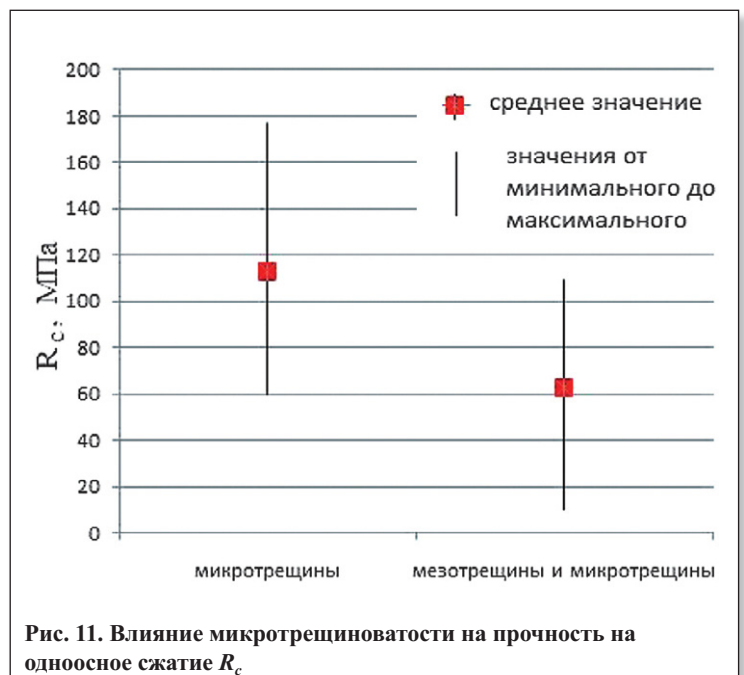
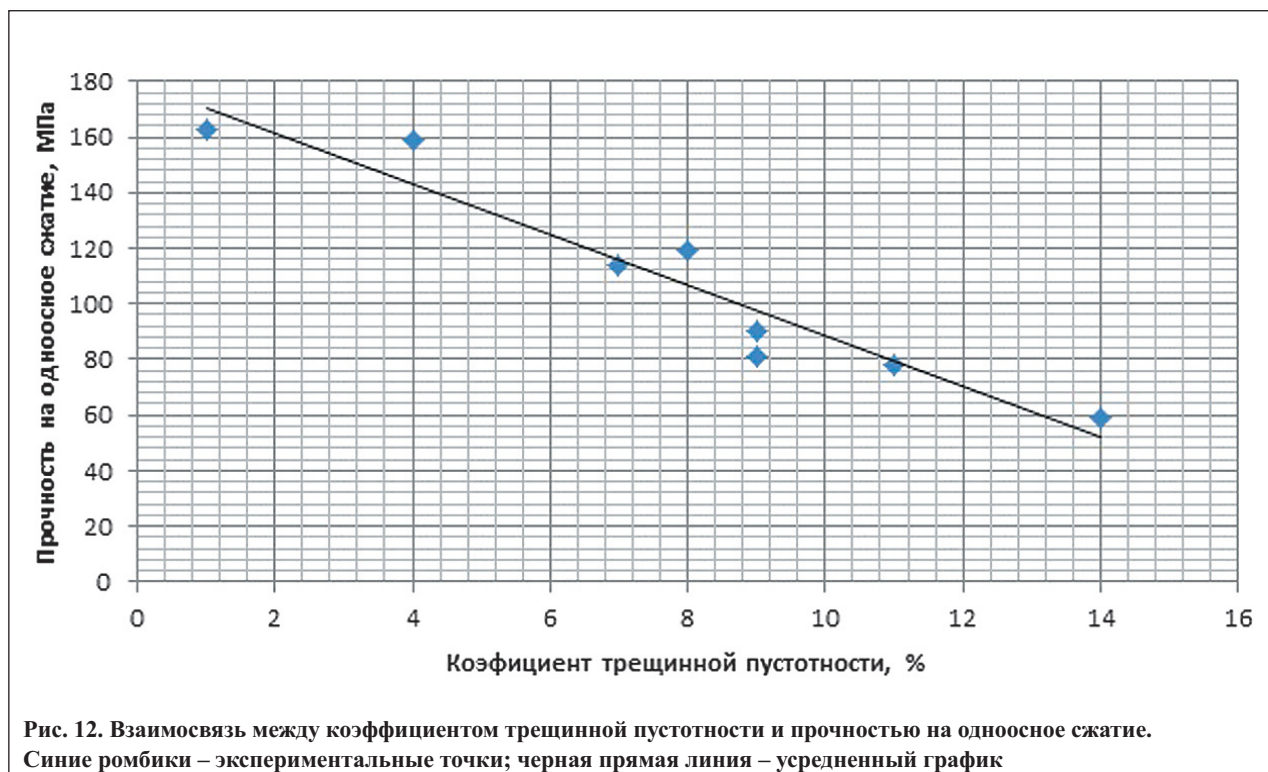


Рис. 11. Влияние микротрещиноватости на прочность на одноосное сжатие R_c



Так как остаточная (неупругая) деформация при определении статического модуля упругости отражает прирост трещин, возникла идея исследовать зависимость между ней и прочностью на одноосное сжатие. В результате было выяснено, что при увеличении остаточной деформации прочность снижается (рис. 13).

Выводы

1. Среди исследованных гранитоидов Алданского щита выделены гранодиориты и граниты, представленные мусковитовыми, биотитовыми, калишпатовыми и пироксеновыми разновидностями. Граниты в основном имеют близкие значения плотности, равные 2,63–2,68 г/см³, и пористость 2,7–5,2%. Гранодиориты существенно плотнее (2,76–2,79 г/см³) за счет повышенного по сравнению с гранитами содержания пироксенов и амфиболов.


2. Исследование микротрещиноватости и расчет коэффициента трещинной пустотности проводились по шлифам на макро- и микроуровнях (в отраженном и флуоресцентном свете). Коэффициент трещинной пустотности, рассчитанный по изображениям, полученным с помощью флуоресцентного микроскопа, отличается завышенными значениями. Он детально характеризует трещиноватость какого-либо отдельного кристалла, но не может использоваться для характеристики интенсивности микротрещиноватости породы в целом.

3. С увеличением коэффициента трещинной пустотности гранитоидов от 1 до 14% их прочностные и упругие свойства заметно снижаются: прочность на одноосное сжатие — со 160 до 60 МПа, динамический модуль упругости — с 85 до 50–55 ГПа, статический модуль упругости — с 30 до 12–15 ГПа.

4. Значения модулей упругости, полученные статическим и динамическим методами, различаются в 2,5–3 раза.

5. Выделено два типа деформационных кривых, полученных при статических испытаниях в условиях одноосного сжатия. Первый тип характеризуется существенным расхождением кривых нагрузки и разгрузки, что объясняется наличием мезотрещин, способствующих возникновению значительных необратимых деформаций. Во втором случае ветви нагрузки и разгрузки практически совпадают. Такой тип кривых наблюдается для образцов, в которых отсутствуют мезотрещины и в процессе нагружения преобладают упругие деформации.

6. Минеральный состав исследованных образцов гранитоидов практически не влияет на статический модуль упругости. Однако у гранодиоритов значения данного показателя являются более низкими, чем у гранитов, т.к. основное влияние на статический модуль упругости оказывает микротрещиноватость.

7. Установлена обратно пропорциональная зависимость между прочностью на одноосное сжатие и остаточной деформацией. 

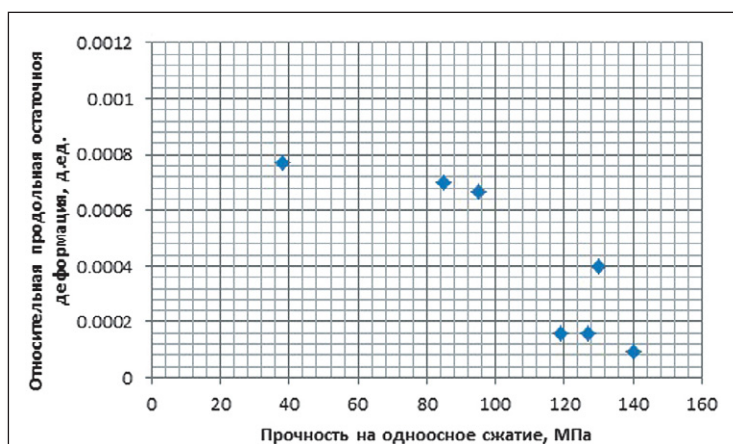


Рис. 13. Зависимость между относительной продольной неупругой деформацией и прочностью на одноосное сжатие.
Синие ромбики — экспериментальные точки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баклашов И.В.* Геомеханика. Том 1. Основы геомеханики. М.: МГТУ, 2004. 208 с.
2. *Голодковская Г.А., Демидюк Л.М., Шаумян Л.В.* Инженерно-геологические исследования при разведке месторождений полезных ископаемых / под ред. Г.А. Голодковской. М.: Изд-во Московского университета, 1975. 185 с.
3. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. М.: Госстандарт СССР, 1991.
4. *Демина Ю.А., Фролова Ю.В., Пискунов В.В., Потрясаев И.И.* Инженерно-геологические особенности вмещающих пород Любавинского золоторудного месторождения (Забайкальский край) // Инженерная геология. 2013. № 1. С. 28–37.
5. *Завойчинская Э.Б., Кийко И.А.* Введение в теорию процессов разрушения твердых тел. М.: Изд-во МГУ, 2004. 168 с.
6. *Красилова Н.С.* Анализ характера трещиноватости скальных пород при мелкомасштабной инженерно-геологической съемке части территории, прилегающей к трассе БАМ // Инженерная геология. 1979. № 4. С. 38–48.
7. *Красилова Н.С.* Закономерности формирования прочности магматических и метаморфических пород и массивов. М.: Изд-во Московского университета, 2006. 231 с.
8. *Никитин В.Н.* Основы инженерной сейсмологии. М.: Изд-во МГУ, 1981. 177 с.
9. *Сергеев Е.М.* Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород (в 2 томах). Том 2. М.: Недра, 1984. 423 с.
10. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований. М.: Госстрой России, 2004.
11. *Фролова Ю.В.* Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 222 с.
12. *Чернышев С.Н.* Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.
13. *Шаумян Л.В.* Природа физико-механических свойств массивов горных пород. М.: Изд-во МГУ, 1988. 192 с.
14. ASTM D 7012-04. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. ASTM, 2004.
15. *Brotons V., Tomás R., Ivorra S., Grediaga A., Martínez-Martínez J., Benavente D., Gómez-Heras M.* Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks // Materials and structures. 2015. V. 9. URL: <http://link.springer.com/article/10.1617/s11527-015-0702-7#page-1>.
16. *Chen Y., Watanabe K., Kusuda H., Kusaka E., Mabuchi M.* Crack growth in Westerly granite during a cyclic loading test // Engineering Geology. 2011. V. 117. № 3-4. P. 189–197.
17. *Hoek E.* Practical rock engineering: e-book. Toronto: Rocscience (electronic resource), 2007. URL: http://www.rocscience.com/hoek/corner/Practical_Rock_Engineering.pdf.

Журнал «Инженерные изыскания» —
лучшая площадка для вашей рекламы!

www.geomark.ru

Реклама