



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ЛЮБАВИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ) ENGINEERING GEOLOGICAL FEATURES OF THE HOST ROCKS IN LUBAVINSKOYE GOLD DEPOSIT (TRANS-BAIKAL TERRITORY)

ДЕМИНА Ю.А.

Магистрант геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, demmo4k@mail.ru

ФРОЛОВА Ю.В.

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

ПISKUNOV В.В.

Геолог ООО «РДМ», г. Москва,
Vladimir.Piskunov@russdragmet.ru

ПОТРЯСАЕВ И.И.

Студент геологического факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова,
г. Москва

DEMINA YU.A.

An undergraduate of the faculty of geology of Lomonosov Moscow State
University, Moscow, demmo4k@mail.ru

FROLOVA YU.V.

An associate professor of the department of engineering and ecological
geology of the faculty of geology of Lomonosov Moscow State University,
candidate of science (Geology and Mineralogy), Moscow,
skalka@geol.msu.ru

PISKUNOV V.V.

A geologist of the «RDM» Ltd, Moscow,
Vladimir.Piskunov@russdragmet.ru

POTRYASAEV I.I.

A student of the faculty of geology of Lomonosov Moscow State University,
Moscow

Ключевые слова:

Забайкальский край; Любавинское золоторудное
месторождение; вмещающие породы; инженерно-
геологические особенности; прочностные свойства;
деформационные свойства; гранодиориты; метасоматиты;
сланцы; микротрещиноватость; степень выветрелости

Key words:

Trans-Baikal Territory; Lubavinskoye gold deposit; host rocks;
engineering geological features; strength properties; deformation
properties; granodiorites; metasomatic rocks; schists,
microjointing; weathering degree

Аннотация

В статье рассмотрены инженерно-геологические особенности вмещающих пород Любавинского золоторудного месторождения Забайкалья. Выделены три генетические группы этих пород — магматические интрузивные (гранодиориты), метаморфические (филлитоподобные сланцы) и метасоматические (березиты). Рассмотрены их физические и физико-механические свойства. Показано влияние на эти свойства различных факторов — минерального состава, структурно-текстурных особенностей, пористости, микротрещиноватости, степени выветрелости.

Abstract

The paper deals with engineering geological features of the host rocks in the Lubavinskoye gold deposit (Trans-Baikal Territory). Such three genetic groups of the rocks as magmatic intrusive (granodiorites), metamorphic (phyllitic schists) and metasomatic (beresites) ones are singled out. Their physical and physical-mechanical properties are considered. Influence of various factors (mineral composition, structural and textural features, porosity, microjointing, weathering degree) on the properties is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Восточное Забайкалье является богатейшим горнорудным районом России, в котором золото — основное полезное ископаемое. Одним из старейших объектов добычи коренного золота в Забайкальском крае является Любавинское месторождение, разрабатываемое с 1881 г. За длительный срок существования этого рудника он несколько раз консервировался. Разведочные работы были малоэффективными из-за слабой изученности месторождения. Многие исследователи, посетившие его в разные годы, указывали на его недоразведанность [2].

Изучением Любавинской рудно-магматической системы занимались такие ученые, как А.П. Герасимов, В.А. Обручев, Н.Н. Биндеман, Ю.В. Соколов, Е.М. Квятковский, В.В. Старченко, Ю.В. Казыцын, Л.В. Таусон, Н.А. Китаев, Р.А. Баумштейн, Р.В. Грабеклис, Г.В. Шубин, В.В. Залуцкий, С.П. Летунов, геологи Читинского геологического управления, Любавинского рудника и многие другие. Результаты этих исследований изложены в многочисленных научных трудах (например, в [2]). В основном они содержат информацию об условиях формирования месторождения, источниках золотого оруденения, геохимическом и петрографическом составе пород и руд Любавинского руд-

ного узла. Данные о свойствах рассматриваемых пород (как палеозойского структурного яруса, так и раннемезозойского возраста) совсем немногочисленны. Они изложены в работе [5].

В последние годы с целью подсчета запасов Любавинского месторождения возобновлены геологоразведочные работы, включающие комплекс инженерно-геологических исследований. В связи с этим возникла необходимость получения данных о физико-механических свойствах вмещающих пород данного месторождения. Целью настоящего исследования является изучение этих пород — их генетической принадлежности, состава, строения и физико-механических свойств. Эти данные необходимы при оценке инженерно-геологических условий Любавинского месторождения.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Любавинское рудное поле расположено на юго-востоке Читинской области в 400 км от областного центра и в 25 км севернее границы России с Монголией. Его общая площадь составляет приблизительно 130 км². В физико-географическом отношении оно занимает приосевую часть южного отрога Станового хребта в междуречье Тырина и Кыры — левых притоков реки Онон, одного из истоков р. Амур (рис. 1).

В тектоническом отношении исследуемый район расположен в пределах Монголо-Охотского складчатого пояса (Монголо-Забайкальской складчатой системы). Его геологическое строение связано с историей развития юго-западной части этого пояса, в частности, с закрытием океанического бассейна и последующей продолжительной коллизией Сибирского и Монголо-Китайского континентов [10].

Стратифицированные образования в пределах месторождения представлены пермо-триасовыми толщами, сложенными метаморфизованными песчано-сланцевыми отложениями. Процессы коллизии и масштабного тектонического сжатия привели к значительным надвиговым и сдвиговым перемещениям, формированию складчатости и интенсивному дислоцированию терригенных пермо-триасовых отложений и их метаморфизации. В условиях сжатия были заложены системы трещин [10]. Интрузивные образования территории представлены гранитоидами юрского возраста. Контуры месторождения совпадают на отдельных участках с Любавинским глубинным разломом субширотного простирания, сформированным в песчано-сланцевой толще. Разлом вмещает так называемые «Любавинские пальцевые интрузии» мезозойских гранитоидов (по данным из отчета ООО «РДМ-Ресурсы» о результатах поисковых и оценочных работ в пределах Любавинского рудного узла за 2006–2008).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы вмещающих пород (из кернов восьми скважин, пробуренных до глубины 108 м) для исследования были предоставлены авторам компанией ООО «РДМ», проводящей геологоразведоч-

ные работы на Любавинском золоторудном месторождении.

В ходе лабораторных исследований определялись и рассчитывались следующие показатели физических и физико-механических свойств пород: плотность ρ , плотность твердых частиц ρ_s , коэффициент выветрелости K_v , пористость n , скорости распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, деформационные характеристики (динамический модуль упругости E_d ; динамический коэффициент Пуассона μ_d ; статический модуль упругости $E_{ст}$; статический коэффициент Пуассона $\mu_{ст}$; модуль общей деформации E_0 ; коэффициент поперечного расширения μ_0), прочность на одноосное сжатие R_c , коэффициент размягчаемости K_p , прочность на разрыв R_p , сцепление C и угол внутреннего трения ϕ . Все определения свойств проводились в лабораториях кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в соответствии со стандартными методиками [3, 6].

Определение деформационных свойств проводилось двумя способами — динамическим методом и при одноосном нагружении образца с постоянной скоростью (статическим методом).

В основе методики определения деформационных характеристик скальных грунтов динамическим методом лежат законы линейной теории упругости. Роль динамической нагрузки выпол-

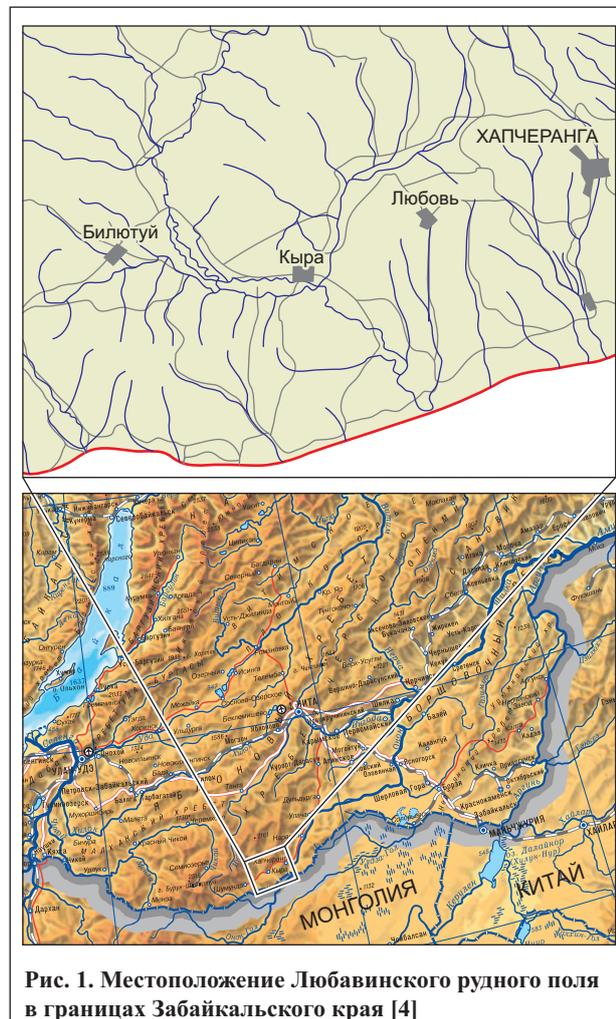


Рис. 1. Местоположение Любавинского рудного поля в границах Забайкальского края [4]

няет ультразвуковой импульс, величина которого, место приложения и направление остаются постоянными в течение опыта. С помощью динамического метода определялись модуль упругости E_d и коэффициент Пуассона μ_d :

$$\mu_d = (V_p^2 - 2V_s^2) / (2(V_p^2 - V_s^2)); \quad (1)$$

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

Определение значений скорости распространения упругих волн, необходимых для расчетов, производилось на приборе «Ультразвук» с частотой работы датчиков 250 кГц.

Определение деформационных характеристик при одноосном сжатии основано на измерении продольных и поперечных деформаций при непрерывном нагружении образца с постоянной скоростью. Измерения проводились на образцах цилиндрической формы с отношением высоты H к диаметру D , максимально приближенным к значению 2. Испытания проводились на гидравлическом полуавтоматическом прессе Controls (с максимальным усилием 1500 кН) с измерительным модулем управления и контроля. Для регистрации деформаций использовалось 8-канальное измерительное устройство Datalog. Измерения деформаций в ходе эксперимента осуществлялись с помощью потенциометрических датчиков линейного перемещения WF 17006. Точность измерения деформации составляла 0,001 мм. Для регистрации продольной деформации использовался один датчик, поперечная регистрировалась тремя датчиками, далее для расчетов бралась средняя величина.

Испытание заключалось в нагружении образца с постоянной скоростью (примерно 1 кН/с) до нагрузки, не превышавшей 50–60% от максимального разрушающего усилия. Далее производилась разгрузка. В процессе нагружения и разгрузки образца регистрировались абсолютные деформации (отсчет снимался каждую секунду). По результатам испытаний были построены деформационные кривые в координатах «напряжение σ — относительная деформация ε ». По ветви нагрузки рассчитывались общий модуль деформации и коэффициент поперечного расширения, по ветви разгрузки — модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Всего было исследовано 48 образцов.

Помимо определения вышеуказанных свойств исследовались состав, структура, текстура и микротрещиноватость пород, в т.ч. проводилось детальное изучение шлифов (изготовленных в шлифовальной мастерской геологического факультета МГУ мастером Г.М. Чураковым) и аншлифов (приготовленных студентом И.И. Потрясаевым и ст.н.с. В.М. Ладыгиным).

Описание шлифов и аншлифов проводилось с помощью оптического микроскопа OLYMPUS в проходящем и отраженном свете.

Для уточнения минерального состава один образец был изучен методом рентгеновской дифрактометрии с помощью дифрактометра «ДРОН-6» аналитиком В.Л. Косоруковым.

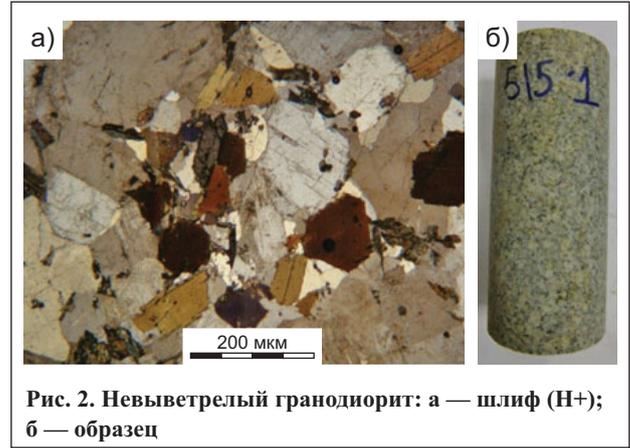


Рис. 2. Невыветрелый гранодиорит: а — шлиф (H+); б — образец

Отдельное внимание было уделено изучению микротрещиноватости пород. Для этого на оптическом микроскопе в отраженном свете были исследованы и сфотографированы аншлифы. По аншлифам описывалась микротрещиноватость и вычислялись коэффициенты трещинной пустотности ($K_{тп}$) по методике Л.И. Нейштадт:

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

где $S_{тр}$ — площадь трещин, рассчитанная по аншлифу с использованием программы Image Score S; S — площадь аншлифа.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МИКРОТРЕЩИНОВАТОСТЬ ПОРОД

В результате детальных петрографических исследований среди пород Любавинского месторождения были выделены три различные по генезису группы — магматические интрузивные, метаморфические и метасоматические породы. Приведем их подробное описание.

Интрузивные породы представлены гранодиоритами, основными породообразующими минералами которых являются плагиоклаз, кварц, биотит, роговая обманка. В отдельных образцах присутствуют калиевый полевой шпат и моноклинный пироксен. Акцессорные минералы представлены сфеном, апатитом и цирконом. Среди вторичных минералов преобладают хлорит, эпидот, низкотемпературный мусковит (серицит), низкотемпературный амфибол, глинистые и карбонатные минералы. Содержание рудных минералов колеблется от 1 до 7%.

Гранодиориты по структуре полнокристаллические, неравномернотернистые (мелко-среднезернистые), гипидиоморфнозернистые; по текстуре — однородные, массивные (рис. 2).

Первичные минералы в различной степени замещены вторичными новообразованиями. Плагиоклазы и калиевые полевые шпаты пелитизированы, в отдельных образцах по ним развиваются серицит и карбонатные минералы (рис. 3, а). По биотиту нередко развиваются низкотемпературный мусковит, а также эпидот, хлорит и рудные минералы (рис. 3, б). Роговая обманка часто замещена низкотемпературным амфиболом. По моно-

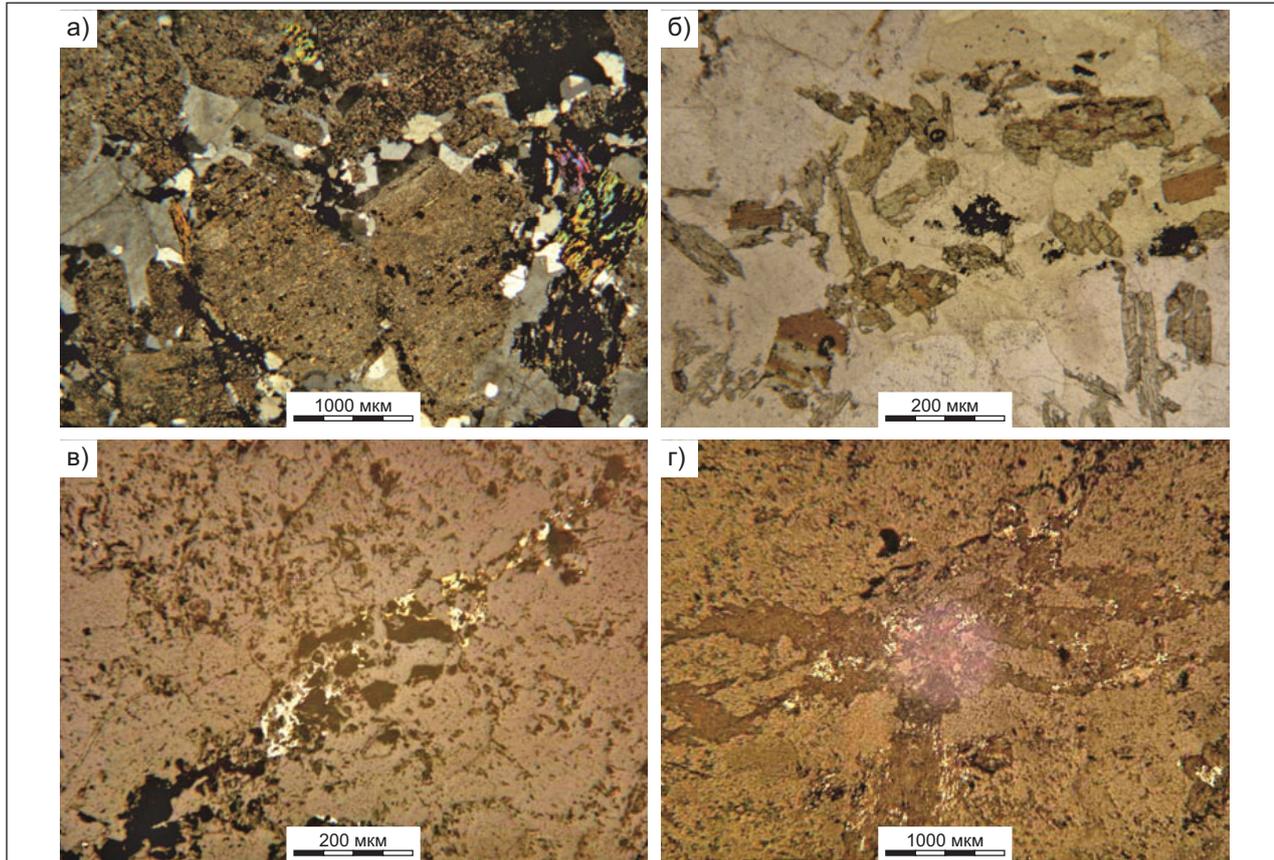


Рис. 3. Вторичные преобразования и трещиноватость гранодиоритов: а — пелитизация полевых шпатов при выветривании (Н+); б — кристаллы биотита, частично замещенные низкотемпературным мусковитом и рудными минералами (1Н); в, г — аншлифы: узкие (в) и широкие (г) тектонические трещины, заполненные кварцем и рудными минералами

клинному пироксену развиваются хлорит, карбонаты и эпидот.

Исследуемые гранодиориты являются в различной степени выветрелыми. Выветрелость проявляется в первую очередь в изменении цвета породы, появлении гипергенных трещин, часто железненных, и пелитизации полевых шпатов (см. рис. 3, а) Согласно классификации скальных и полускальных грунтов (по ГОСТ 25100-95) по коэффициенту выветрелости среди исследуемых гранодиоритов выделены следующие группы: (1) невыветрелые ($K_{кв} = 1$); (2) слабыветрелые ($0,9 < K_{кв} < 1$); (3) выветрелые ($0,8 < K_{кв} < 0,9$).

Микротрещиноватость. По данным, полученным при макроописании трещиноватости и детальном изучении аншлифов под микроскопом, согласно классификации [9] выделены две группы пород: (1) с открытыми тектоническими и наложенными на них гипергенными трещинами; (2) с закрытыми трещинами. Среди закрытых трещин по генезису можно выделить тектонические и первичные петрогенетические. Тектонические трещины — волосовидные, без заполнителя; очень узкие и узкие, заполненные кварцем, карбонатными, глинистыми и рудными минералами, прямолинейные и извилистые, ровные, прерывистые (рис. 3 в, г). Также во всех образцах присутствуют первичные трещины, развитые в кристаллах калиевого полевого шпата и плагиоклаза. Первичные трещины являются прямолинейными, волосовидными, прерывистыми.

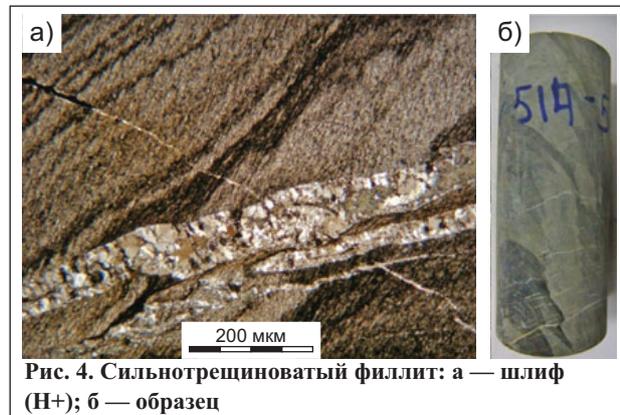


Рис. 4. Сильнотрещиноватый филлит: а — шлиф (Н+); б — образец

Метаморфические породы представлены серицит-хлоритовыми микросланцами (филлитами). К основным породообразующим минералам здесь относятся серицит, кварц, хлорит; в отдельных образцах присутствует альбит (рис. 4, а). Содержание рудных минералов, как правило, не превышает 1%, однако в некоторых образцах их количество доходит до 10%.

По абсолютному размеру зерен выделяются тонкозернистые и тонко-мелкозернистые структуры, по относительной величине зерен — гомеобластовые и гетеробластовые структуры, по форме кристаллов различаются гранолепидобластовые и лепидобластовые разновидности. Различны и текстуры сланцев: большая их часть имеет ориентированные текстуры (полосчатые, сланцеватые), также встречены плейчатые (рис. 5, а) и массив-

ные различия. Ориентированные текстуры образованы чередованием прослоев различной зернистости и/или различного состава. Прослои в большинстве случаев расположены наклонно к оси зерна (рис. 4, б). Однако в некоторых образцах наблюдается вертикальная слоистость.

Микротрещиноватость. Все образцы пересечены разноориентированными различными по степени открытости микротрещинами и прожилками, заполненными преимущественно кварцем, реже альбитом, слюдой, эпидотом, кальцитом, глинистыми и рудными минералами (рис. 5, б).

По характеру и интенсивности микротрещиноватости выделяются две группы сланцев. Образцы первой группы относятся к слабо- ($K_{\text{тр}} < 2\%$) и среднетрещиноватым ($K_{\text{тр}} = 2\div 5\%$). В них выделяются две системы трещин, различных по направлениям в отношении к сланцеватости и перпендикулярных между собой. Трещины в данных системах очень узкие и узкие, в основном прямолинейные, прерывистые, заполненные кварцем, глинистыми и частично рудными минералами, реже слюлистыми минералами и эпидотом (рис. 5, в). Вторая группа объединяет сильно- ($K_{\text{тр}} = 5\div 10\%$) и очень сильнотрещиноватые ($K_{\text{тр}} > 10\%$) сланцы. В них выделяются три системы трещин, различных по направлениям по отношению к сланцеватости, причем одна из них совпадает с направлением сланцеватости. Трещины различны по степени открытости (от волосовидных и очень узких до

широких), форме (прямолинейные, извилистые), характеру разветвления (перистые, елочковидные), могут быть как прерывистыми, так и непрерывными по всей ширине шлифа. Различен и состав заполнителя: обычно трещины заполнены кварцем, рудными и глинистыми минералами, реже встречаются альбит и карбонатные минералы (рис. 5, з). Также по ним часто наблюдается ожелезнение.

Метасоматические породы представлены березитами. Березитизация представляет собой один из самых распространенных типов околожильных преобразований и известна для месторождений золота, серебра, полиметаллов и др. В частности, березиты рассматриваются как типоморфная метасоматическая формация для золотых руд. Березиты являются низко-среднетемпературными метасоматитами ($T = 200\div 400\text{ }^{\circ}\text{C}$), образующимися в результате кислотного метасоматоза ($\text{pH } 4\text{--}5$) по кислым и средним магматическим, терригенным породам и продуктам их метаморфизма. Основными минералами являются серицит (мусковит), кварц, карбонаты и пирит [7, 8].

Метасоматиты Любавинского месторождения образованы по гранитоидам и по сланцам. Рассмотрим отдельно эти группы пород.

Березиты, образованные по гранитоидам (рис. 6, б). Первичные породообразующие минералы гранитоидов — плагиоклаз, кварц, биотит, калиево-натриевый полевой шпат — под воздействием гидротермальных растворов разлагаются и замещаются

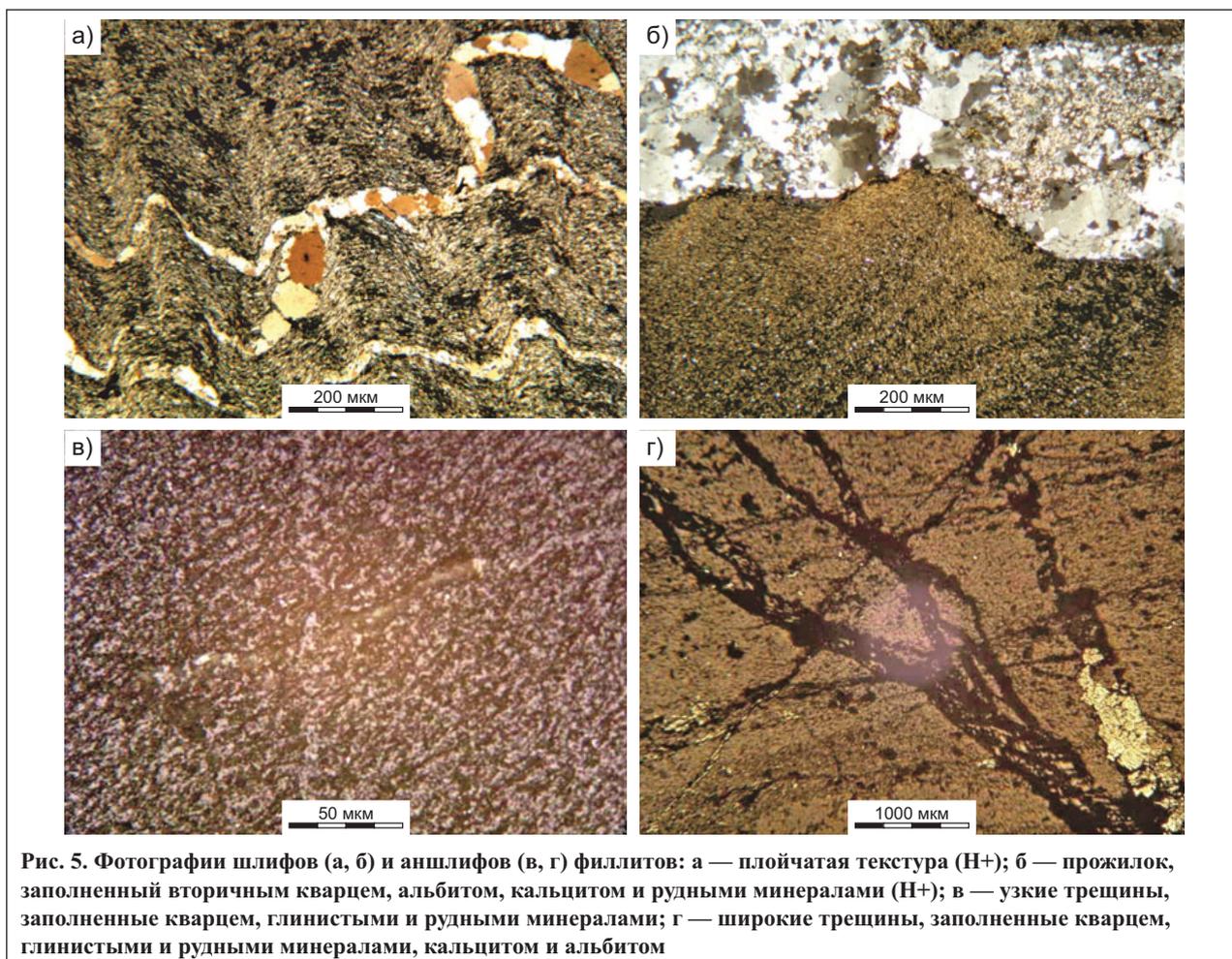


Рис. 5. Фотографии шлифов (а, б) и аншлифов (в, г) филлитов: а — плейчатая текстура (Н+); б — прожилок, заполненный вторичным кварцем, альбитом, кальцитом и рудными минералами (Н+); в — узкие трещины, заполненные кварцем, глинистыми и рудными минералами; г — широкие трещины, заполненные кварцем, глинистыми и рудными минералами, кальцитом и альбитом

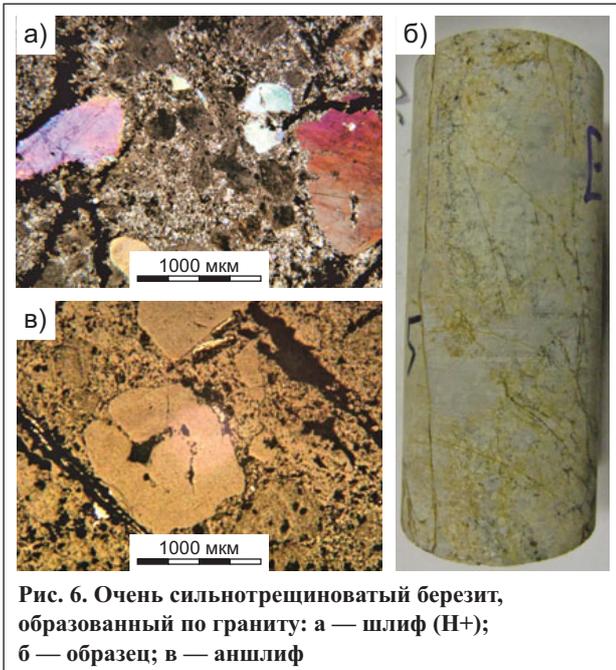


Рис. 6. Очень сильнотрещиноватый березит, образованный по граниту: а — шлиф (Н+); б — образец; в — аншлиф

вторичными новообразованиями. Среди вторичных минералов преобладают серицит/мусковит и кварц, в меньшем количестве присутствуют карбонатный минерал ряда «доломит — анкерит» и хлорит (рис. 6, а). Мусковит образует крупные вкрапленники размером до 3 мм, серицит псевдоморфно замещает первичные кристаллы в виде мелкочешуйчатых агрегатов. Метасоматический кварц развивается в виде мелкозернистых гранобластовых агрегатов, в которых встречаются крупные реликтовые кристаллы первичного кварца. Во многих образцах встречаются такие вторичные минералы, как пирит, эпидот, сфен, апатит, рутил, гетит, лимонит. Содержание рудных минералов в образцах достигает 10%.

По структуре березиты являются неравномернозернистыми, тонко-мелкосреднезернистыми, порфиробластовыми; по текстуре — массивными.

Микротрещиноватость. В березитах выделяются две группы трещин. Одну из них образуют первичные петрогенетические трещины, развивающиеся в кристаллах кварца и плагиоклаза. Эти трещины являются волосовидными и очень узкими, прямо-

линейными, прерывистыми. К другой группе относятся вторичные трещины тектонической природы и, возможно, трещины гидроразрыва. Они образуют три системы различных направлений по отношению к оси керна. Эти трещины прямолинейны по форме, различны по степени открытости (от волосовидных и очень узких до широких) и характеру разветвления (перистые, елочковидные), могут быть как прерывистыми, так и непрерывными по всей ширине шлифа. В составе заполнителя выделяются кварц, карбонатные и рудные минералы (рис. 6, в).

Березит по сланцу. Породообразующие минералы: кварц, биотит, мусковит. Содержание рудных минералов — не более 1%. Структура породы — тонко-мелкозернистая, гетеробластовая, лепидогранобластовая; текстура — полосчатая, образованная переслаиванием тонко- и мелкозернистых прослоев, темных и более светлых (рис. 7, а, б).

В березитах, образованных по сланцам, выделяются две системы трещин, различных по направлениям по отношению к слоистости. Эти трещины прямолинейны по форме, различны по степени открытости (от волосовидных и очень узких до широких), елочковидны по характеру разветвления, могут быть как прерывистыми, так и непрерывными по всей ширине шлифа. В составе их заполнителя выявлены кварц, карбонатные и рудные минералы.

По коэффициенту трещинной пустотности, по Л.И. Нейштадт [9], все исследованные породы разделены на слабо- (< 2%), средне- (2–5%), сильно- (5–10%) и очень сильнотрещиноватые (> 10%). Следует еще раз подчеркнуть, что в данной работе речь идет о микротрещиноватости.

ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Значения физических и физико-механических свойств пород Любавинского месторождения приведены в табл. 1. Плотность и пористость вмещающих пород месторождения варьируют незначительно и в целом близки у всех трех генетических групп. Между тем прочностные и деформационные свойства исследованных пород изме-



Рис. 7. Сильнотрещиноватый березит, образованный по сланцу: а — образец; б — шлиф (Н+)

Таблица 1

Значения физических и физико-механических свойств пород Любавинского месторождения*												
Породы (количество образцов)		Плотность воздушно-сухого грунта, г/см ³	Плотность твердых частиц, г/см ³	Пористость, %	Динамический модуль упругости, ГПа	Динамический коэффициент Пуассона, д.ед.	Статический модуль упругости, ГПа	Коэффициент анизотропии, д.ед.	Модуль общей деформации, ГПа	Прочность на одноосное сжатие, МПа	Угол внутреннего трения, град.	Сцепление, МПа
Интрузивные (10)	мин.–макс.	2,52–2,77	2,69–2,78	0,1–8,5	37,7–58,9	0,19–0,33	7,0–53,4	1,0	4,2–42,4	41–87	49–65	5–16
	средн.	2,67	2,72	1,8	46,3	0,26	22,0		19,1	66	54	11
Метаморфические (30)	мин.–макс.	2,53–2,84	2,73–2,85	0,1–9,7	15,3–72,3	0,24–0,36	7,7–46,4	0,8–2,4	4,8–42,6	9–71	13–60	3–14
	средн.	2,70	2,77	2,6	59,3	0,30	18,8		1,3	17,6	32	38
Метасоматические (8)	мин.–макс.	2,62–2,80	2,71–2,81	0,3–5,5	33,1–70,8	0,29–0,34	9,1–50,0	1,0	5,1–24,6	38–82	49–57	7–13
	средн.	2,70	2,77	2,3	51,7	0,32	26,1		17,1	61	53	10

няются в широких пределах и зависят от многих факторов — генезиса, степени выветрелости, направления сланцеватости, трещиноватости и др.

Деформационные свойства

Динамический модуль упругости. В целом динамический модуль упругости E_d закономерно возрастает с увеличением плотности и снижением пористости (рис. 8). На графиках его зависимости от плотности и пористости выделяются некоторые области с близкими значениями для групп пород, определенных по петрографическим характеристикам. Следует, однако, отметить, что в каждой из групп из общей тенденции выбиваются пониженные или повышенные значения модуля.

Наиболее высокими значениями E_d обладают породы метаморфического генезиса. При этом на фоне общей закономерности среди них выделяется сильнотрещиноватый ($K_{тп} > 10\%$) филлит с ярко выраженной наклонной к оси зерна сланцеватостью, который имеет пониженное значение модуля, равное 15,3 ГПа (см. рис. 4, б). Наличие трех

систем трещин, одна из которых совпадает с направлением сланцеватости, вызывает сильное снижение скорости прохождения упругих волн через образец, что, соответственно, уменьшает динамический модуль упругости. Так, для большинства исследуемых образцов метаморфических пород коэффициент анизотропии примерно равен единице, т.е. они являются изотропными. Однако у четырех проб коэффициент анизотропии больше 1,5, т.е. они анизотропны, что объясняется их резко выраженной сланцеватой текстурой.

Трещиноватость и сланцеватость образцов имеют в основном субвертикальный характер (располагаются параллельно оси зерна). Поэтому при измерениях скоростей вдоль оси зерна сланцеватость и трещиноватость не влияли на полученные значения. При замере скоростей поперек оси зерна их значения снизились до 50%.

В группе интрузивных пород при близких значениях плотности 2,65–2,70 г/см³ величины модуля упругости изменяются от 37 до 58 ГПа. Это связано, во-первых, с различной степенью выветрелости, а во-вторых — с различной интенсивностью

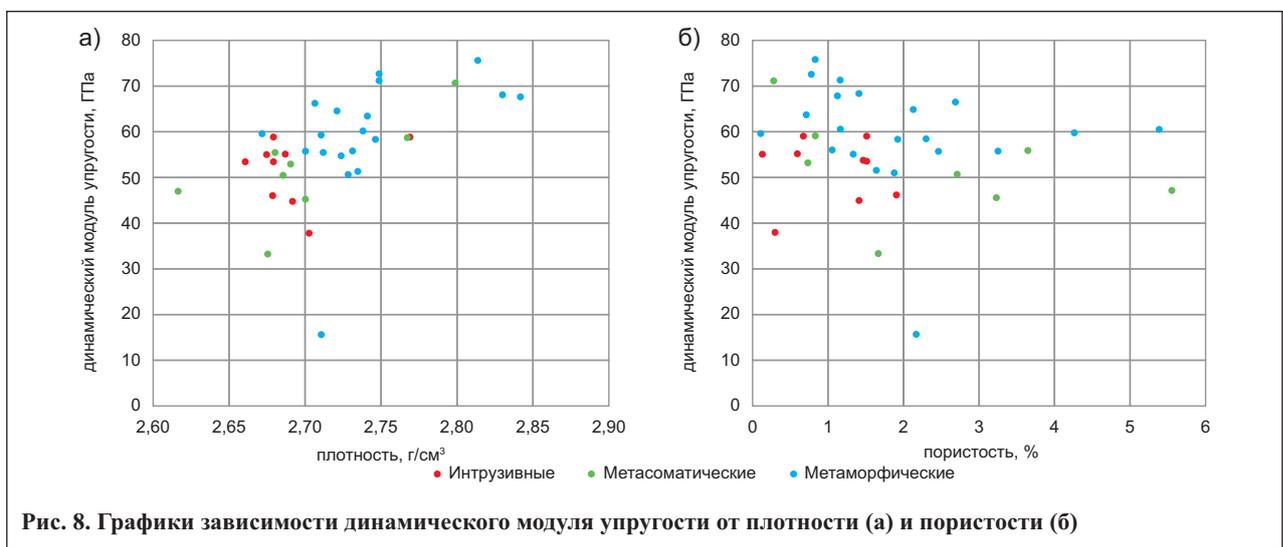


Рис. 8. Графики зависимости динамического модуля упругости от плотности (а) и пористости (б)

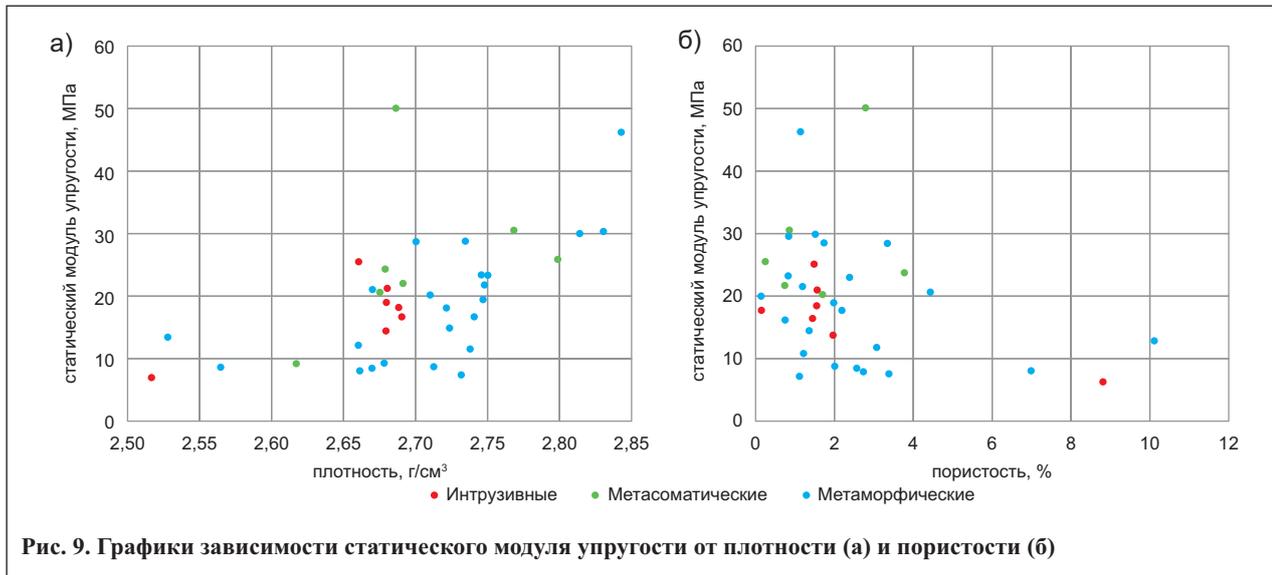


Рис. 9. Графики зависимости статического модуля упругости от плотности (а) и пористости (б)

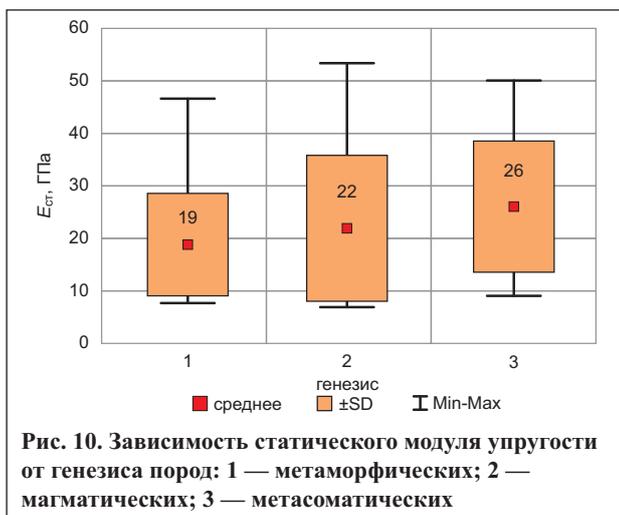


Рис. 10. Зависимость статического модуля упругости от генезиса пород: 1 — метаморфических; 2 — магматических; 3 — метасоматических

трещиноватости. Следует отметить, что при испытании наиболее выветрелого и трещиноватого образца гранита не удалось определить скорости прохождения упругих волн вследствие затухания ультразвукового сигнала при его просвечивании.

В группе метасоматических пород пониженным значением модуля упругости обладает сильнотрещиноватый березит, образованный по сланцу (см. рис. 7, а).

В целом при анализе графиков видно, что наименьшими значениями плотности и динамического модуля упругости обладают породы метасоматического и интрузивного происхождения. Более высокие значения E_d сланцев объясняются тем, что в них преобладает субвертикальная ориентировка трещин и сланцеватости, не снижающая скорости прохождения упругих волн, входящие в расчет динамического модуля упругости.

Статический модуль упругости. Статический модуль упругости $E_{ст}$ также повышается при увеличении плотности и уменьшении пористости пород (рис. 9). Однако следует отметить, что в этом случае в отличие от ситуации с динамическим модулем метаморфические породы обладают более низкими деформационными характеристиками по сравнению с интрузивной и метасоматической группами (рис. 10, см. табл. 1). Таким образом,

динамический и статический модули определяются различными факторами.

На деформационные свойства пород во многом влияет не только степень трещиноватости, но и ориентировка самих трещин. В частности, трещины и сланцеватость, ориентированные субвертикально, значительно снижают $E_{ст}$ сланцев, но не влияют на E_d , значения которого остаются высокими.

Среди метасоматических пород выделяется значительно более высокое значение статического модуля упругости ($E_{ст} = 50,5$ ГПа) слаботрещиноватого плотного березита по граниту с большим содержанием вторичного кварца, образующего прочную гранобластовую структуру (см. рис. 6, б).

Общая тенденция влияния трещиноватости на величину $E_{ст}$ показана на рис. 11: с увеличением степени трещиноватости статический модуль упругости снижается почти в три раза.

Анализ деформационных кривых. Как известно, деформирование скальных грунтов представляет собой сложный физический процесс, в котором обычно выделяют несколько стадий. Процесс этот в целом нелинейный и зависит от большого количества разных факторов [1].

По графикам зависимости относительной деформации от напряжения, полученным при одноосном нагружении образцов, можно проследить характер деформирования породы. В начале опыта при нагружении в большинстве случаев отмечается значительное развитие деформаций и соответствующий участок кривой имеет вогнутую форму. Это объясняется тем, что на данной стадии в образце закрываются поры и микротрещины. Затем при увеличении нагрузки деформации развиваются менее интенсивно. На этом участке взаимосвязь « $\sigma - \epsilon$ » является линейной, происходит упругое деформирование минерального скелета породы.

Величина остаточных деформаций пород, судя по полученным графикам, зависит от степени трещиноватости. У слабо- и среднетрещиноватых образцов ветви нагрузки/разгрузки располагаются близко друг к другу, т.е. преобладают упругие деформации (рис. 12, а). Общая относительная продольная деформация ($\epsilon_{прод}$) в таких породах не

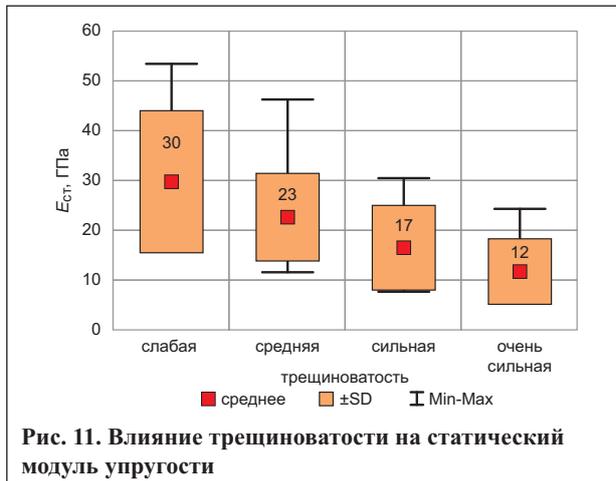


Рис. 11. Влияние трещиноватости на статический модуль упругости

превышает 0,2%. При деформировании сильно- и очень сильнотрещиноватых образцов общая деформация достигает 0,5%, при этом возникают большие остаточные деформации (рис. 12, б).

Прочностные свойства

По прочностным свойствам гранодиориты и метасоматиты близки между собой, а сланцы отличаются пониженными значениями соответ-

ствующих параметров (рис. 13). Так, прочность сланцев на одноосное сжатие ($R_c = 32$ МПа) в два раза меньше по сравнению с гранодиоритами ($R_c = 66$ МПа) и метасоматитами ($R_c = 61$ МПа).

Сцепление и угол внутреннего трения сланцев также существенно ниже (см. табл. 1). Все исследованные породы в целом относятся к неразмываемым, хотя в пределах каждой группы есть размываемые разновидности. Снижение прочности при водонасыщении связано с повышенной трещиноватостью пород и пелитизацией плагиоклазов при выветривании.

Основным фактором, влияющим на прочностные характеристики, также является трещиноватость (рис. 14). При увеличении ее степени прочность на одноосное сжатие снижается от 72 до 28 МПа для пород от слабо- до очень сильнотрещиноватых.

Для гранодиоритов выявлено изменение прочности с увеличением степени выветрелости (табл. 2). Зона выветривания распространяется на глубину около 20 м. При этом происходит увеличение трещиноватости — расширение и углубление тектонических трещин. По трещинам развивается ожелезнение. Полевые шпаты замещаются вторичными глинистыми минералами. В результате

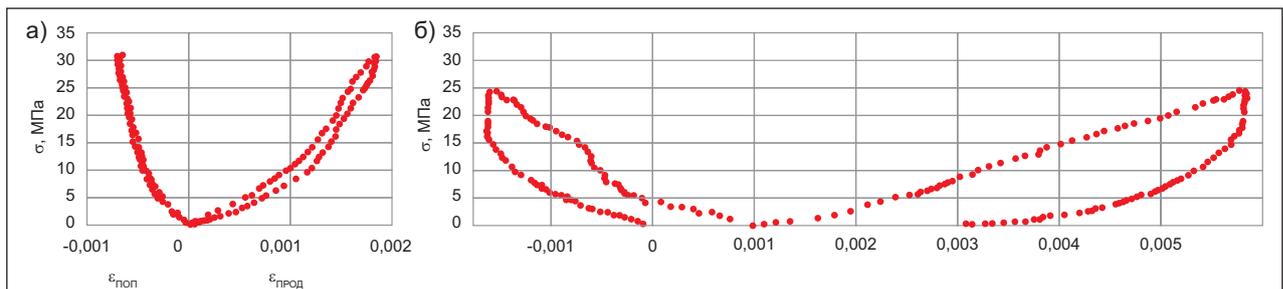


Рис. 12. Деформационные кривые (для скальных грунтов это достаточно стандартные графики [1]): а — для слаботрещиноватого гранодиорита; б — для сильнотрещиноватого метасоматита ($\epsilon_{\text{поп}}$ — относительная поперечная деформация; $\epsilon_{\text{прод}}$ — относительная продольная деформация; σ — напряжение)

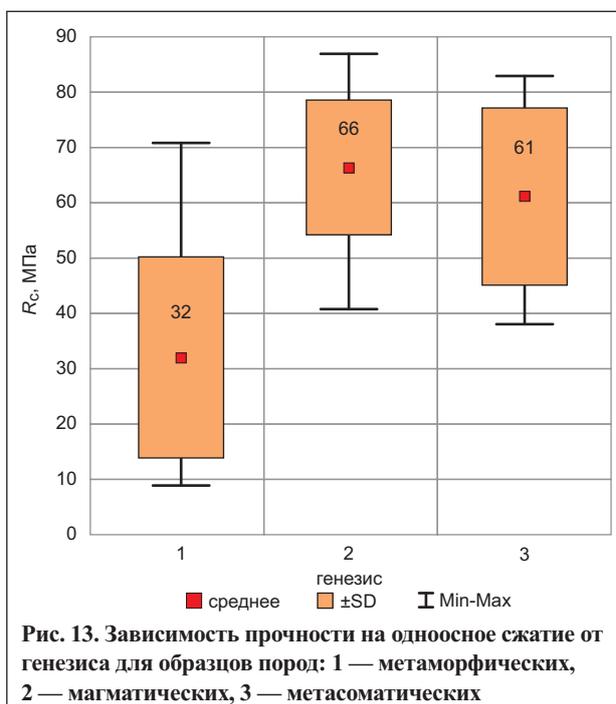


Рис. 13. Зависимость прочности на одноосное сжатие от генезиса для образцов пород: 1 — метаморфических, 2 — магматических, 3 — метасоматических

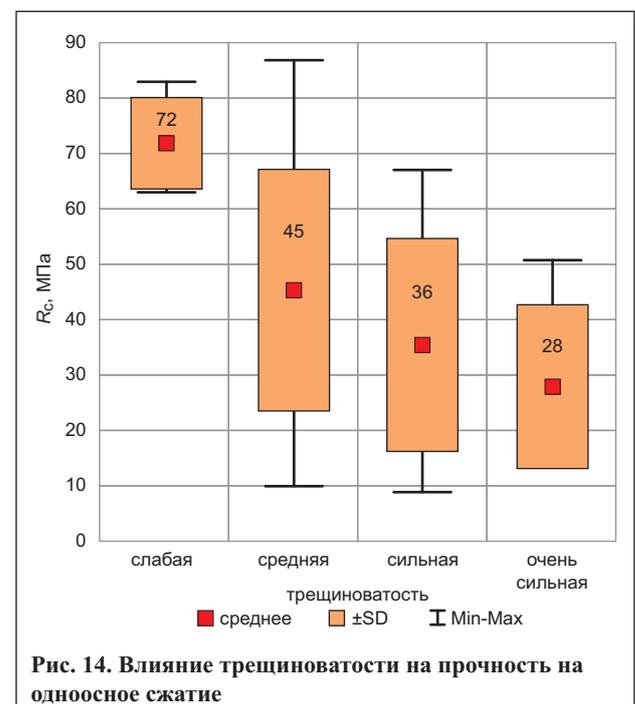
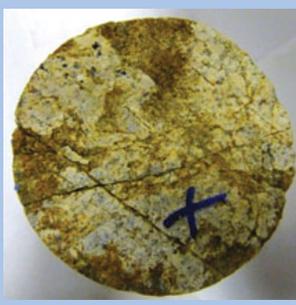


Рис. 14. Влияние трещиноватости на прочность на одноосное сжатие

Таблица 2

Влияние выветривания на прочностные свойства гранодиоритов			
Показатель	Группа пород по степени выветрелости		
	невыветрелые, $K_v = 1$	слабовыветрелые, $K_v = 0,9 \div 1,0$	выветрелые, $K_v = 0,8 \div 0,9$
ρ , г/см ³	2,77	2,64–2,69	2,52
R_c , МПа	87	61–79	41
K_p , д.ед.	0,84–1,00	0,59–1,00	0,42
C , МПа	16	8–12	5
Фотография			

выветривания гранодиориты разупрочняются: прочность на одноосное сжатие снижается в два раза, сцепление — в три раза. При водонасыщении сильно выветрелые породы размягчаются.

Заключение

Проведенные исследования показали, что вмещающие породы Любавинского месторождения различны по генезису, составу, текстурно-структурным особенностям, трещиноватости и степени выветрелости.

Выделены три группы пород, различных по генезису, — магматические интрузивные (гранодиориты), метаморфические (филитоподобные сланцы) и метасоматические (березиты). Все три группы имеют близкие значения плотности и пористости, однако отличаются по физико-механическим свойствам. В частности, наименее прочными являются метаморфические породы: их прочность в среднем в два раза ниже, чем у магматических и метасоматических. Аналогичная закономерность наблюдается и для статического модуля упругости.

Установлено, что главным фактором, влияющим на свойства пород, является их трещиноватость. По коэффициенту трещинной пустотности выделены четыре разновидности пород — слабо-, средне-, сильно- и очень сильнотрещиноватые. При увеличении степени трещиноватости прочность и модуль упругости снижаются (у очень сильнотрещиноватых пород они в три раза меньше, чем у слаботрещиноватых). Анализ деформационных кривых показал, что при нагружении слабо- и среднетрещиноватых образцов преобладают упругие деформации, а при деформировании сильно- и очень сильнотрещиноватых пород возникают большие остаточные деформации.

Следует отметить, что на свойства пород влияет не только степень трещиноватости, но и ориентировка трещин. Так, субвертикальные и слабона-

клонные к оси керны трещины не влияют на динамические упругие характеристики (они остаются высокими), но снижают статический модуль упругости и прочность.

Заметное влияние на свойства оказывает процесс выветривания, проявляющийся в развитии гипергенных трещин, ожелезнении и пелитизации полевых шпатов. Значения прочностных свойств и модуля упругости гранодиоритов при выветривании снижаются в два-три раза.

В группе метаморфических пород помимо степени трещиноватости важным фактором являются также их текстурные особенности, в частности ориентировка сланцеватости. Так, значения динамического модуля упругости в направлении, перпендикулярном сланцеватости, снижаются у некоторых образцов на величину до 60%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклашов И.В. Геомеханика. Т. 1: Основы геомеханики. М.: Изд-во МГУ, 2004. 208 с.
2. Биндеман Н.Н. Геологическое строение Любавинского золоторудного месторождения // Разведка и охрана недр. 1968. № 10. С. 6–8.
3. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
4. Замана Л.В., Вахнина И.Л. Техногенные ландшафты и гидрогеохимия Любавинского рудного поля (Юго-Восточное Забайкалье). Чита: Изд-во Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 2010.
5. Инженерная геология СССР. Т. 3: Восточная Сибирь / под ред. Г.А. Голодковской. М.: Изд-во Московского университета, 1977. 655 с.
6. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
7. Метасоматизм и метасоматические породы / под ред. В.А. Жарикова, В.Л. Русикова. М.: Научный мир, 1998. 492 с.
8. Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических горных пород / под ред. В.С. Попова, О.А. Богатикова. М.: Логос, 2001. 768 с.
9. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.
10. Спиридонов А.М. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: Гео, 2006. 291 с.