

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ, ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРПЕНТИНИТОВ — ИНДИКАТОРЫ ПАЛЕОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ (на примере зоны Главного Уральского разлома)

Л.Л. Панасьян, Т.В. Посухова, Е.Б. Черепецкая, Чжан Цзини

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119999, Москва, Ленинские горы, 1, Россия*

Исследованы состав, структура и свойства разных генетических типов серпентинитов, развитых по ультрабазитам и отобранных из массивов, расположенных вдоль Главного Уральского разлома (ГУР) — палеозойской субдукционной зоны. Рассмотрены особенности серпентинитов, образованных по хромитонесущим ультрабазитам, по метаморфизованным зонам карбонатных пород и в пределах коры выветривания ультраосновных пород. Проведено их сопоставительное исследование. Методами ИК-спектроскопии, электронной микроскопии, термического, рентгенодифрактометрического и электронно-зондового анализов изучены микроструктуры, химический и фазовый составы серпентинитов. Определены главные петрофизические свойства и особенности акустической эмиссии. Выделено несколько генетических и текстурных групп серпентинитов, развитых по различным протолитам (мантийным и коровым) в разных геологических условиях.

Серпентин, акустическая эмиссия, зона ГУР, субдукция.

MINERALOGICAL, PETROPHYSICAL, AND ACOUSTIC FEATURES OF SERPENTINITES, INDICATORS OF THE PALEODYNAMIC CONDITIONS OF THEIR GENESIS (by the example of the Main Ural Fault zone)

L.L. Panas'yan, T.V. Posukhova, E.B. Cherepetskaya, and Zhang Jini

The composition, structure, and properties of different genetic types of serpentinites developed after ultrabasic rocks are studied. The rocks were sampled from massifs located along the Main Ural Fault, in a Paleozoic subduction zone. We consider specific features of serpentinites developed after chromite-bearing ultrabasic rocks, in metamorphic zones of carbonate rocks, and within the zone of weathering of ultrabasic rocks. A comparative study of the microstructure and chemical and phase compositions of serpentinites is carried out by IR spectroscopy, scanning electron microscopy, and thermal, X-ray diffraction, and microprobe analyses. The petrophysical properties and acoustic emission of the rocks are examined. Several genetic and structural groups of serpentinites developed after different protoliths (mantle and crustal) in different geologic conditions are recognized.

Serpentine, acoustic emission, Main Ural Fault zone, subduction

ВВЕДЕНИЕ

Минералы группы серпентина — полигенные образования, формирующиеся в различных геологических условиях. Экспериментальные данные показывают, что разные полиморфные модификации серпентина стабильны при разных температурах и давлении, устойчивой фазой при высоких давлениях является антигорит. Установлено также, что упругие характеристики, включая скорости продольных и поперечных волн, меняются в зависимости от фазового состава серпентина [Speziale et al., 2012]. Полученные данные свидетельствуют, что фазовые переходы минералов группы серпентина могут быть реперами глубинных мантийных и субдукционных процессов [Bezacier et al., 2010], а упругие характеристики минералов могут быть использованы при интерпретации геофизических данных о глубинном строении литосферы [Rosa et al., 2010; Murakami, 2010]. Сейсмические переходы в субдуцированных слэбах ниже переходной зоны трудно объяснить без учета формирования ориентированных текстур, характерных для слоистых силикатов. Наибольший интерес вызывают водосодержащие фазы системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, являющейся модельным объектом, и изучение их свойств позволяет моделировать геологические процессы в зонах субдукции [Gemmi et al., 2010]. С этой точки зрения изучение особенностей состава и свойств серпентинитов различного генезиса с целью выявления особенностей минералов, образовавшихся при высоких давлениях и температурах, является весьма актуальным.

Для данного исследования были отобраны серпентиниты, слагающие различные горные массивы в пределах Главного Уральского разлома (ГУР), который является палеозойской субдукционной зоной.

Она сформировалась как мощная субвертикальная глубинная дизъюнктивная система в позднем палеозое, на коллизионной стадии замыкания Уральского палеоокеана [Пучков, 1997, 2000]. По данным глубинных геофизических исследований Уральского разлома, он представляет собой пограничную зону мантийного заложения на стыке двух древних плит. Она разделяет палеоокеанический и палеоконтинентальный литосферные блоки и обрамлена с востока полосой ультрабазитовых протрузий, сложенных комплексом серпентинизированных дунитов, перидотитов, пироксенитов, габбро [Вализер и др., 2013]. Считается, что структуры палеоокеанического сектора Урала образовывались с участием зон серпентинитового меланжа, игравшего роль смазки при разгрузке напряжений [Федоров, Расцветаев, 1998].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований были отобраны серпентиниты из различных месторождений Урала, различающиеся по минеральному составу и структурно-текстурным характеристикам. Химическая, минеральная и структурная неоднородности образцов контролировались несколькими независимыми методами. Диагностика фазового состава серпентинитов проводилась тремя методами. На первом этапе был использован метод ИК-спектроскопии. Съемка спектров проводилась методом пасты в вазелиновом масле на ИК-Фурье-спектрофотометре фирмы «Мониторинг» (аналитик Е.Е. Бушуева). На втором этапе проводили термический анализ образцов на дериватографе Q1500. Аналитик Л.В. Мельчакова. На третьем этапе выполняли рентгенодифрактометрический анализ на приборе ДРОН-3 в следующем режиме: излучение Cu, фильтровано Ni, напряжение на трубке 30 кВ, сила тока 20 А; снимали насыпные образцы в кюветках в диапазоне 2θ от 1 до 60°. Особенности химического состава серпентинитов изучались методом электронно-зондового анализа на приборе CAMEBAX при ускоряющем напряжении 15 кВ и силе тока зонда 30 А. В качестве эталонных образцов сравнения использовались природные минералы и искусственные соединения: Mg—оливин, Si, Al, Fe—роговая обманка, Ti—MnTiO₃, Ni—NiO, Cr—Cr₂O₃ (аналитик И.А. Брызгалов). Всего было выполнено 32 анализа в точке. Структурно-петрофизический анализ проводили на прозрачно-полированных шлифах оптико-микроскопическими методами на микроскопах фирмы «OLYMPUS». Микроструктурные особенности серпентинитов изучали в лаборатории локальных методов исследования вещества МГУ на микронзондовом комплексе на базе растрового (сканирующего) электронного микроскопа Jeol JSM-6480LV. Образцы изучали под золотым напылением толщиной около 30 нм. Растровые электронные изображения были получены во вторичных электронах при ускоряющем напряжении 15 кВ и силе тока 11 нА. Были изучены две серии образцов. Образцы первой серии — мелкодробленый (< 0.1 мм) материал (порошки), нанесенный на двустороннюю углеродную пленку, закрепленную на стекле. Образцы второй серии — крупные (3—5 мм) обломки пород, закрепленные на алюминиевом держателе эпоксидной смолой.

Физико-механические свойства серпентинитов изучали с применением как стандартных, так и оригинальных методик. Измерение величины микротвердости проведено на приборе ПМТ-3М фирмы «ЛЮМО» в искусственных запрессовках образцов под нагрузкой 20—100 г в течение 10 с. Плотность минеральных объектов измеряли несколькими независимыми методами. Стандартным способом гидростатического взвешивания измеряли плотность небольших кусков неправильной формы. Плотность образцов правильной формы вычисляли по их массе и объему. Эти данные дополнены определением плотности твердой фазы с помощью оригинального прибора, изобретенного на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ [PELA-2]. В приборе используется метод взвешивания породы, измельченной в порошок до размера частиц 0.25 мм при вакуумировании стандартного объема. Определение скоростей продольных и поперечных волн проводили на стандартном ультразвуковом приборе с излучателями и приемниками продольных и поперечных волн с собственными частотами датчика и приемника 250 КГц. Измерения выполняли на 2—3 образцах кубической формы объемом 9—16 см³. Из тех же проб изготавливали плоскопараллельные пластинки размером 5 × 40 мм и кубики с ребром порядка 25 мм, на которых определялась частотная зависимость фазовых скоростей и коэффициента затухания продольных и сдвиговых акустических волн с помощью лазерного импульсного акустического метода с оптическим источником ультразвука. Исследования выполнены в международном лазерном центре МГУ на установке UDL-2M-«Геоскан-02М» [Cherepetskaya et al., 2005]. Длительность возбуждаемых ультразвуковых импульсов была менее 100 нс, что соответствовало частотному диапазону 0.2—30 МГц. Амплитуда давления составляла 10 МПа при чувствительности приемного тракта 5 Па, что позволяло измерять коэффициенты затухания во всем частотном диапазоне вплоть до 40 см⁻¹. Оценку характерных размеров рассеивателей (максимального, среднего и минимального) при их логарифмически-нормальном распределении проводили в соответствии с работами [Stanke, Kino, 1984; Карабутов и др., 2008]. Испытания на одноосное сжатие осуществляли на прессе CDM-2 с одновременным измерением акустической эмиссии (АЭ). Получены и проанализированы результаты по изучению АЭ при нагружении с постоянной скоростью (100 кг/мин) подачи нагрузки, равной для

всех образцов, которые имели форму куба с ребром 3 или 4 см. АЭ параметры измеряли с помощью 4-канальной системы акустико-эмиссионного контроля СДС 1008. Согласно [ГОСТ 27655-88], фиксировали и вычисляли N_{Σ} — число зарегистрированных импульсов дискретной АЭ (количество событий) за весь интервал времени наблюдения, активность Σ — сумма событий за прошедшее время t , суммарный счет N и скорость счета \dot{N} , среднее значение максимальной амплитуды и энергии АЭ сигналов в 1 с, частотный спектр.

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРПЕНТИНИТОВ

Сопоставительные исследования проводились на нескольких генетически различных типах серпентинитов, слагающих Уральский хребет.

Продукты изменения основных и ультраосновных пород, развивающихся по дунитам, гарцбургитам и пироксенитам (обр. 8, 10, 14).

Образец 8 (макроскопически однородный) отобран из серпентинитов, замещающих первичные ультраосновные породы, слагающие хр. Урала. Преобладающей силикатной фазой является *лизардит*. При изучении шлифов выявлены псевдоморфозы серпентина по первичным силикатам. Псевдоморфозы по оливину сохраняют округлую форму первичного минерала, которая подчеркивается концентрически-зональной трещиноватостью, появившейся из-за увеличения объема при серпентинизации: $2(\text{Mg,Fe})_2 \cdot \text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4$. Выявлено зональное строение псевдоморфоз (рис. 1, в), их центральные части сложены пластинчатыми частицами, а краевые — трубчатыми. Методами РЭМ установлено, что лизардит с хризотилом не образуют закономерно ориентированных текстур и формируют спутанно-волокнисто-чешуйчатую массу, в которой размер отдельных зерен составляет менее 1 мкм.

Образец 10 (отчетливо-полосчатый образец серпентинита) отобран из Баженовского месторождения асбеста. Полосчатая текстура образца сформирована прожилками, сложенными трубчатыми частицами хризотила и светло-зеленой основной массой, в которой преобладающей силикатной фазой является *пластинчатый лизардит*. При петрографических исследованиях отчетливо прослеживается полиминеральный состав микротрещиноватой, неравномерно-зернистой породы и ее пластинчато-слоистая текстура. Выявляется прожилковое строение минеральных агрегатов, видны остатки зерен первичных силикатов, установлены их корродированные граничные контакты с серпентином, а также выделения оксидов Fe (см. рис. 1, е), образующиеся при таком замещении, причем выделения магнетита маркируют границы зерен первичных протосиликатов. Пластинчатые частицы серпентина имеют площадные размеры от 1 до 200 мкм, их толщина не превышает 1 мкм. Изометричные рудные частицы (черные в проходящем свете и белые в отраженных электронах) также варьируют по размерам от 2 до 200 мкм.

Образец 14 отобран из метасоматизированных хромитонесных пород в карьере около г. Магнитогорск. В породе макроскопически отчетливо выделяется светло-зеленый мономинеральный прожилок шириной до 1.5 см на фоне микротрещиноватой основной массы, в которой преобладающей силикатной фазой является *клинохризотил*. Трещины залечены белыми выделениями асбеста. Петрографическими исследованиями установлены псевдоморфозы серпентина по зернам пироксена (см. рис. 1, з) с реликтами спайности. Выявлено параллельно-шестоватое строение выделений серпентина, в его массе есть прожилки, заполненные слюдястым материалом. Ширина прожилков составляет порядка 200 мкм. Характерно неравномерно-зернистое строение породы: на фоне микрокристаллической основной массы присутствуют более крупные лейсты серпентина (до 0.1 мм) и зерна с высокими интерференционными окрасками. По границам силикатных зерен развивается магнетит. В РЭМ выявлено равномерно-гладкое строение поверхности частиц. Нет закономерно ориентированных текстур, частицы серпентина формируют сплошную массу с преобладанием своеобразных подушкообразных форм, в которых размеры отдельных зерен составляют менее 1 мкм.

Продукты метасоматического замещения магнезиальных карбонатных пород. Для них характерна метасоматическая зональность — последовательная смена пород разного минерального состава [Варлаков, 2000]: неизменные породы → серпентинизированные породы → серпентиниты → карбонатизированные (оталькованные) серпентиниты → тальк-карбонатные породы → кварц-карбонатные породы (листвениты). Изучались плотные разности, известные как поделочные камни — благородный змеевик, офиокальцит (обр. 7, 9).

Образец 7 — светло-желтый серпентинит месторождения Сатка. Спектроскопическими методами установлено, что преобладающей силикатной фазой в нем является *антигорит*, однако макроскопически в образце наблюдаются извилистые прожилки асбеста шириной до 2 мм и длиной более 5 см. Основная масса породы (между прожилками) сложена микрозернистыми сростаниями серпентина с кальцитом. Серпентин имеет характерную для антигорита пластинчатую форму с неровными рваными краями. Размер отдельных зерен колеблется от 5 до 150 мкм, а толщина пластинок — менее 2 мкм. Зерна карбо-

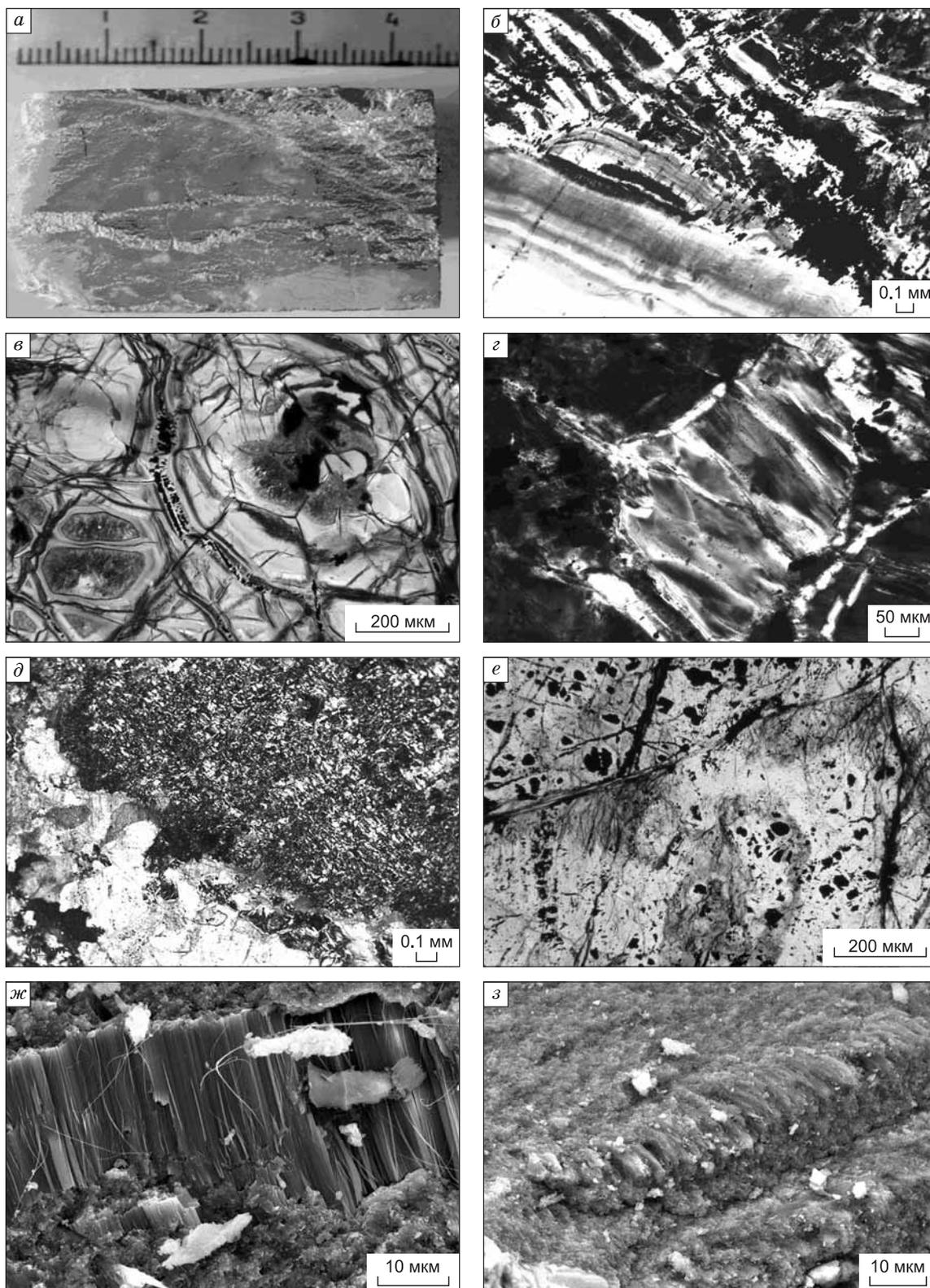


Рис. 1. Фазовая и структурная неоднородность изученных серпентинитов Урала.

a — макропрожилки хризотила (обр. 14), *б* — проявление микрослоистости, *в* — псевдоморфозы по оливину (обр. 8), *з* — псевдоморфозы по пироксену, *д* — граница серпентина и карбонатов (обр. 7), *е* — выделения магнетита по границам зерен (обр. 10), *ж*, *з* — присутствие в лизардитовой матрице минеральных включений (светлое), не относящихся к группе серпентина. Фото (*б—е*) сделаны в проходящем свете, николи \times , фото (*ж—з*) получены методом РЭМ во вторичных электронах.

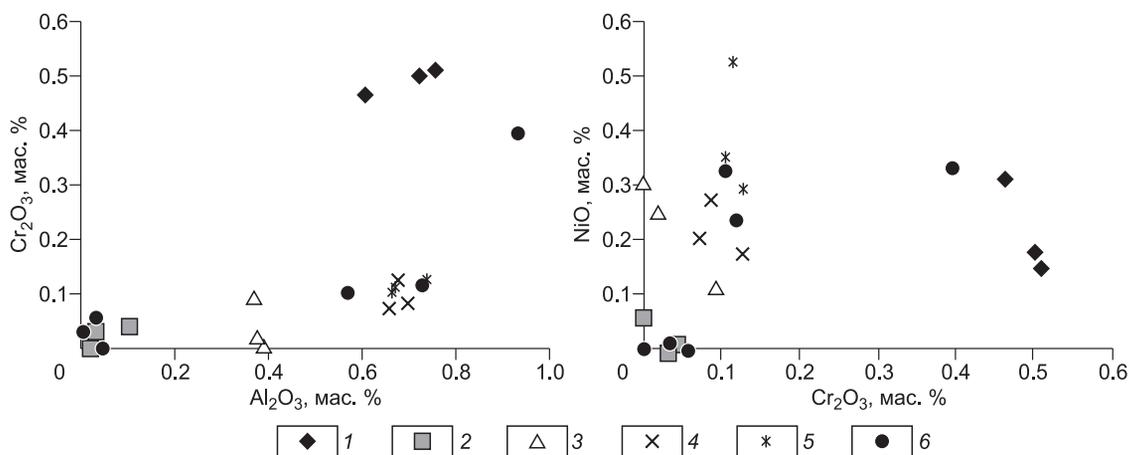


Рис. 2. Особенности химического состава изученных серпентинитов.

1 — обр. 10, 2 — обр. 9, 3 — обр. 14, 4 — обр. 4, 5 — обр. 7, 6 — обр. 8.

ната крупнее (до 500 мкм) и отличаются правильной кристаллографической огранкой и изометричным обликом (см. рис. 1, д). Вкраплений рудных минералов нет.

Образец 9 — светло-зеленый просвечивающий однородный офиокальцит из талькового месторождения Шабры. Преобладающей силикатной фазой является *антигорит*, наряду с которым, как показали петрографические исследования, присутствуют выделения карбонатов с высокими интерференционными окрасками. Структура породы неравномерно-зернистая. Серпентин представлен пластинчатыми и колломорфными частицами размером от 5 до 100 мкм. В этой однородной матрице выявляются изометричной формы включения карбонатов (см. рис. 1, з), их размер варьирует от 50 до 1000 мкм. Выявлены остатки зерен первичных силикатов. По характерному полисинтетическому двойникованию они диагностированы как плагиоклазы.

Образования коры выветривания. *Образец 4* — темноокрашенный серпентинит, отобран из коры выветривания ультраосновных пород рядом с месторождением Липовка около г. Екатеринбург. Преобладающей силикатной фазой является *клинохризотил*, образующий скрытокристаллический агрегат, сложенный гладкими чешуйчатыми зернами размером менее 50 мкм. Второй важнейшей фазой в образце является аморфный гидратированный оксид кремния — опал. Выделения этого минерала имеют размеры 150×1000 мкм, насыщены флюидными (газово-жидкими) включениями размером менее 10 мкм. В образце присутствуют многочисленные вкрапления оксидов железа, образованных при замещении первичных магнезиально-железистых силикатов, и отдельные зерна вторичных карбонатов: пироаурита — $Mg_6Fe_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$. Отличительная особенность породы — ее повышенная трещиноватость, причем все трещины заполнены вторичными гидроксидами железа.

Результаты электронно-зондового анализа [Posukhova et al., 2012] показали, что изученные образцы различаются по химическому составу. По содержанию Al (рис. 2) четко выделяются три группы: 1 — высокоглиноземистые образцы (обр. 10, 4, 8) с содержанием Al_2O_3 выше 0.6 мас. %; 2 — низкоглиноземистые (обр. 9, 7) с содержанием Al_2O_3 меньше 0.1 мас. %; 3 — среднеглиноземистые (обр. 14), в которых содержание Al_2O_3 колеблется от 0.3 до 0.5 мас. %. По содержанию хрома и никеля также выделяются три группы: 1 — высокохромистые серпентиниты (обр. 10) с Cr_2O_3 выше 0.45 мас. %; 2 — низкохромистые (обр. 8, 9) с низкими содержаниями никеля, в которых Cr_2O_3 и NiO менее 0.1 мас. %; 3 — высокохромистые (обр. 7, 14) со значительным содержанием никеля ($Cr_2O_3 < 0.2$ мас. %; NiO = 0.2—0.5 мас. %).

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ СЕРПЕНТИНИТОВ

Результаты изучения петрофизических параметров представлены в работе [Posukhova et al., 2012]. В табл. 1 приведены показатели, которые контролируются фазовым составом и структурой: v_p и v_s (км/с) — скорости продольной и поперечной волны, K_A — коэффициент анизотропии, акустоэмиссионные характеристики. Величины изученных параметров и значения их показателей в исследованных породах представлены как средние величины по данным измерений цилиндрических и кубических образцов объемом более 2 см³.

Таблица 1. Состав, структура и петрофизические свойства изученных серпентинитов Урала

Параметр	Номер образца					
	8	10	9	7	4	14
	Нурали	Баженовское	Шабры	Сатка	Липовка	Магнитка
	Неориентированная	Ориентированная	Неориентированная	Ориентированная	Неориентированная	Ориентированная
K_A	0.92	1.37	1.0	1.04	1.41	1.1
v_p , км/с	<u>5.4—6.7</u> 5.8	<u>3.2—5.4</u> 4.55	<u>5.7—7.3</u> 6.38	<u>3.5—5.0</u> 4.23	<u>1.2—4.1</u> 2.96	<u>4.5—5.0</u> 4.75
v_s , км/с	<u>2.9—3.7</u> 2.82	<u>1.7—2.6</u> 2.0	<u>2.4—2.7</u> 2.58	<u>1.9—2.2</u> 2.05	<u>0.6—2.5</u> 1.7	<u>2.1—2.6</u> 2.30
Акустическая эмиссия						
Высокочастотная область 1—3 МГц	1700/37 —	2000/37 3000/37	425/37.5 780/38	240/35.5 550/37	8000/37 5500/37	— —
Среднечастотная область 0.5—1 МГц	700/39 —	800/53 1000/54	440/56 325/38	130/52 220/52 225/54	3000/55 2000/50	— — —
второй пик	750/58	—	140/55	—	—	—
Среднечастотная область 0.1—0.5 МГц	1200/58 —	930/58 1100/58	300/58—62 440/56	130/58 280/56 250/56	3800/60 2300/58	— — —
Низкочастотная область менее 0.1 МГц	— 600/47	700/45 800/42—48	400/40 210/57	135/42—51 210/47 200/45	2500/55 1850/55	— — —
второй пик	700/62	—	125/42	—	—	—

Примечание. Пояснение см. в тексте. Акустическая эмиссия — отношение суммарного счета к энергии (дБ).

Величина микротвердости варьирует значительно от 21 до 1111 г/мм². Максимальную твердость имеет благородный светло-зеленый просвечивающий серпентинит (офиокальцит), минимальную — зеленый серпентин с ясно различимыми крупными прожилками хризотил-асбеста из Баженовского месторождения и желтый благородный серпентин с прожилками хризотил-асбеста из магнезиальных метасоматитов.

Объемная плотность для образцов 8, 7, 4, 14 меняется незначительно и близка к плотности серпентинитов (2.50—2.55 кг/м³ — хризотил, 2.50—2.70 — антигорит, 2.55—2.60 — лизардит), приводимой в справочной литературе [Вертушков, Авдонин, 1992; Strunz, Nickel, 2001]. В образцах 10 и 9 она снижается из-за присутствия включений слюды и карбонатов. Повышенная плотность твердой фазы пород определяется присутствием примесей оксидов Fe.

Открытая пористость в неизмененных серпентинитах (обр. 8) соответствует пористости первичных пород. Например, у перидотитов этот показатель колеблется от долей до нескольких процентов, а в содержащих карбонаты и серпентины кимберлитах до 25 % [Уразаев, 1971; Зинчук и др., 2002]. В наших образцах, подверженных метасоматическому преобразованию и выветриванию, пористость достигает 14.6 % (обр. 7, 9). Максимальные значения установлены в обр. 10, что определяется присутствием пустот в трубчатых выделениях асбеста. В обр. 4 также отмечается значительное повышение гигроскопической влажности, что связано с присутствием примеси опала.

Повышенные значения скоростей продольных волн (v_p), полученные по обоим методикам, наблюдаются в направлении, параллельном ориентированности минералов в породе. Минимальные скорости упругих волн ($v_p = 1.2$ км/с, $v_s = 0.6$ км/с) имеет обр. 4 — клинохризотил с опалом, максимальные ($v_p = 4.5$ км/с; $v_s = 2.6$ км/с) — обр. 9 — антигорит из зеленого офиокальцита. Особенно четко влияние макро- и микротрещиноватости на величину v_p прослеживается по анализу скоростей, измеренных на базе 5 и 40 мм в режиме лазерно-ультразвуковой эхоскопии (табл. 2). Результаты измерений с помощью системы Геоскан-02М показывают, что величина v_p больше для образцов размером 5 мм, чем для образцов размером 40 мм, поскольку в маленьких образцах нет микротрещиноватости. Исключение составляет обр. 9 из-за наличия в нем микровключений карбонатов. Уменьшение скоростей этих волн для более крупных образцов породы свидетельствует о наличии микродефектов в виде трещин с характерными масштабами от 1 мм до 300 мкм. Максимальное снижение этого параметра происходит в сильно оже-лезненном по трещинам обр. 4.

Коэффициент анизотропии оценивался по обоим типам скоростей упругих волн с учетом двух направлений измерения. Значения коэффициента анизотропии, установленные с помощью лазерной оп-

Таблица 2. Результаты измерения скоростей упругих волн с помощью системы Геоскан-02М

Номер образца (место отбора)	Минералого-генетическая группа		Группа по структуре	Скорость волны, км/с	
				$\frac{v_p}{v_p}$ (на базе 5 мм) v_p (на базе 40 мм)	$\frac{v_s}{v_s}$ (на базе 5 мм) v_s (на базе 40 мм)
8 (Нурали)	Лизардит	1	Неориентированная	5.7 4.2	2.9 2.3
10 (Баженовское)			Ориентированная	6.5 (темная часть), 5.4 (волокнам) 2.8	2.6—2.8 2.6
9 (Шабры)	Антигорит + карбонат	2	Неориентированная	5.8 4.5	2.23 2.6
7 (Сатка)			Ориентированная	4.6—4.9 4.1	2.7—2.8 2.2
4 (Липовка)	Клинохризотил + опал + пироаурит	3	Неориентированная	3.6—4.1 1.2	1.9—2.5 0.6
14 (Магнитка)			Ориентированная	5.0 4.5	2.6 2.1

тико-акустической системы, изменялись от 1.1 на частоте 0.5 МГц до 1.3 на частоте 6 МГц для продольных волн и соответственно от 1.3 до 1.5 для сдвиговых волн. Более высокими показателями анизотропии характеризуются обр. 10 (с отчетливой полосчатой структурой) и интенсивно трещиноватый обр. 4.

Особое внимание было уделено обр. 10, содержащему белые полосы волокнистого асбеста толщиной 1—4 мм в скрытокристаллической темно-зеленой основной массе, состоящей из лизардита. Измерения проведены для трех произвольно выбранных темных участков и для одного из белых прожилков. Диаметр зондирующего ультразвукового пучка составлял 2 мм. В указанных прослоях коэффициент затухания измерялся в одном и том же диапазоне частот от 0.3 до 20 МГц. На рис. 3 приведены три наиболее типичные кривые частотных зависимостей фазовых скоростей для образцов темных участков (см. рис. 3, а, кривые 1, 2) и «белого» прожилка (кривая 3). Их свойства различны. Для первого темного образца значение фазовой скорости практически не изменяется во всем частотном диапазоне от 0.5 до 10 МГц и составляет 4750 ± 50 м/с. Для второго темного образца скорость увеличивается от 3750 до 4250 м/с с изменением частоты от 0.5 до 4 МГц и остается постоянной в диапазоне частот 6—10 МГц и равной 3250 ± 50 м/с (см. рис. 3, а, кривая 2). Резкое уменьшение скорости продольных волн в диапазоне 4—6 МГц свидетельствовало о наличии микродефектов в виде трещин с характерными масштабами от 1 мм до 300 мкм. Исследование образца в режиме лазерно-ультразвуковой эхоскопии подтвердило наличие областей разуплотнения. Значения коэффициента анизотропии, введенные для скоростей упругих волн, изменялись от 1.1 на частоте 0.5 МГц до 1.3 на частоте 6 МГц для продольных волн и соответственно от 1.3 до 1.5 для сдвиговых волн.

Для трех темных прослоев с увеличением частоты колебаний коэффициент затухания увеличивался от 0.5 до 6.5 см^{-1} . Для белого прослоя, сложенного асбестом, этот параметр увеличивался в 3 раза на

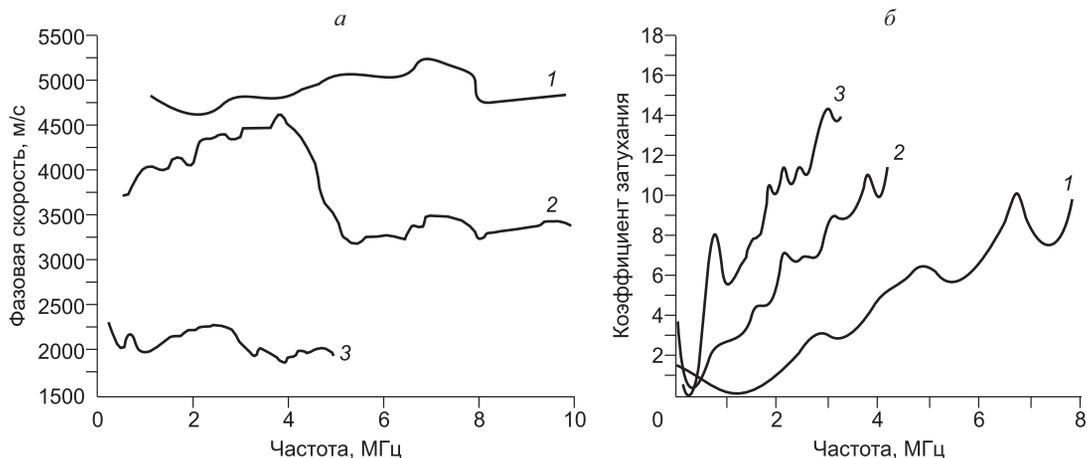


Рис. 3. Типичные частотные зависимости фазовых скоростей для образцов серпентинитов.

а — для двух темных участков (кривые 1, 2) и одного белого (кривая 3); б — частотные зависимости коэффициента затухания для этих образцов.

низких частотах и в 1.3 раза — на высоких. Скорость продольных волн при этом изменялась мало и составляла $(4900—5100) \pm 50$ м/с для обеих разновидностей, что позволяет оперировать обобщенными характеристиками скоростей продольных волн в целом для всей породы.

Анализ частотных зависимостей коэффициента затухания показал, что данная характеристика упругих волн наиболее чувствительна к анизотропии (см. рис. 3, б). Коэффициент анизотропии по затуханию может отличаться более чем в 20 раз, например, на частоте 1 МГц (см. рис. 3). Более того, частотная зависимость коэффициента затухания, представленная в координатах $\alpha(f^2)$ как функция f^2 , позволяет оценить максимальный радиус рассеивателей (размер зерен) a_{\max} . Максимальная скорость продольных волн выявлена вдоль ориентации зерен с максимальным размером 110 мкм, а максимальные поперечные размеры зерен по результатам лазерной ультразвуковой спектроскопии составляли 60 мкм. Для остальных образцов повышенные значения скоростей продольных волн в большинстве случаев наблюдались в направлении, параллельном ориентированности минералов в породе. Минимальные скорости упругих волн (продольных волн — 1300 м/с, сдвиговых — 800 м/с) имели образцы клинохризотила с опалом, а максимальные (4800, 2600 м/с) — образцы антигорита из зеленого офиокальцита. По данным значениям скоростей были пересчитаны модули Юнга и коэффициенты Пуассона, которые в значительной степени зависят от анизотропии породы и ориентированности минералов в ней.

Проведенные исследования показали, что каждый из изученных образцов имеет особые акустоэмиссионные свойства. Наиболее информативными параметрами АЭ при изучении горных пород являются: активность, которую можно охарактеризовать углом наклона усредненной кривой скорости событий АЭ; интенсивность АЭ ($\Sigma N = f(t)$); распределение импульсов по полосам частот. В исследованных образцах серпентинитов максимальная энергия высокочастотного излучения (область 1—5 МГц) во всех группах не меняется и составляет 37 дБ; для среднечастотного излучения (0.1—1.0 МГц) — 53—58 дБ, а для низкочастотного (до 0.1 МГц) в среднем 45 дБ (42—62 дБ). Установлено, что обр. 8, 9, обладающие большей прочностью, имеют по два максимума среднечастотного излучения (рис. 4). Такая закономерность отражает формирование в породе устойчивой магистральной поверхности разрушения, в отличие от других образцов, в которых разрушение происходит на локальных уровнях.

Для *первой генетической группы* различия АЭ выявляются и при сопоставлении типов кривых для образцов с отчетливо проявленной ориентированной текстурой и более равномерно-зернистых образцов.

Первый тип кривых получен для одного из образцов серпентинитов Нуралинского массива (обр. 8) с неориентированной структурой и относительно крупными псевдоморфозами по оливину. Он характеризуется приблизительно одинаковым количеством импульсов в частотном диапазоне 0.5—3.0 МГц (рис. 5, а). Общая сумма импульсов с максимальной энергией здесь достигает 4000. Кривая АЭ этого образца характеризуется наличием большого количества максимумов событий (всплеск—отсутствие) на всем протяжении опыта вплоть до полного разрушения породы. Общее высокочастотное излучение в этом образце ниже, чем в обр. 10, где наблюдается ориентированная структура.

Второй тип кривых (см. рис. 5, б) получен для обр. 10 из Баженовского месторождения с отчетливо проявленной ориентированной полосчатой текстурой. В этом случае на первых этапах нагружения эмиссия почти отсутствует, затем примерно на $\frac{1}{2}$ величины прочности на одноосное сжатие происходит резкое увеличение активности, уровень которой в дальнейшем остается примерно постоянным. По срав-

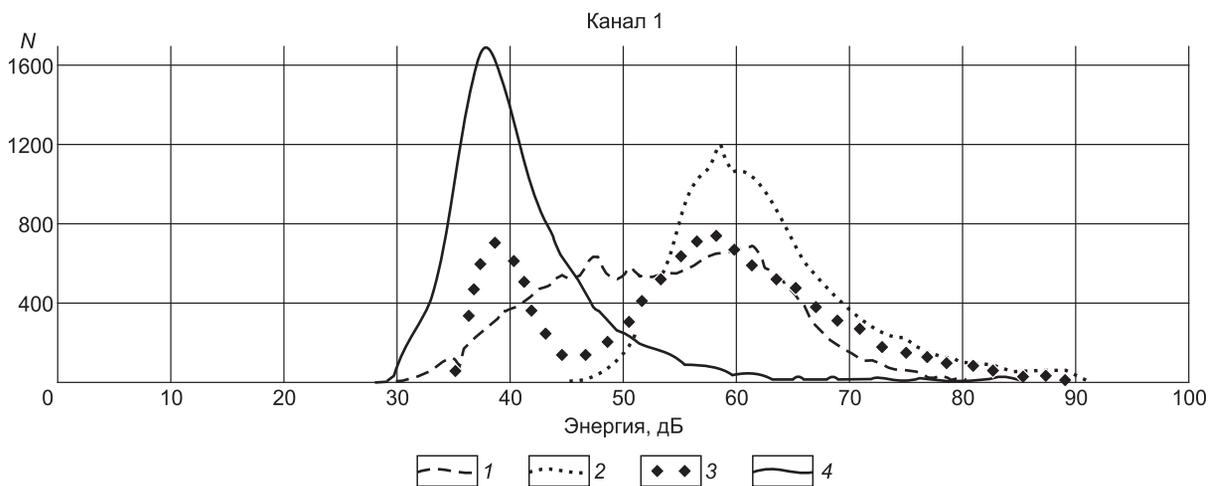


Рис. 4. Гистограмма распределения максимальных энергий АЭ по полосам частот для обр. 8.

1—4 — частота: 1 — 0—100 кГц, 2 — 100—500 кГц, 3 — 0.5—1.0 МГц, 4 — 1—3 МГц.

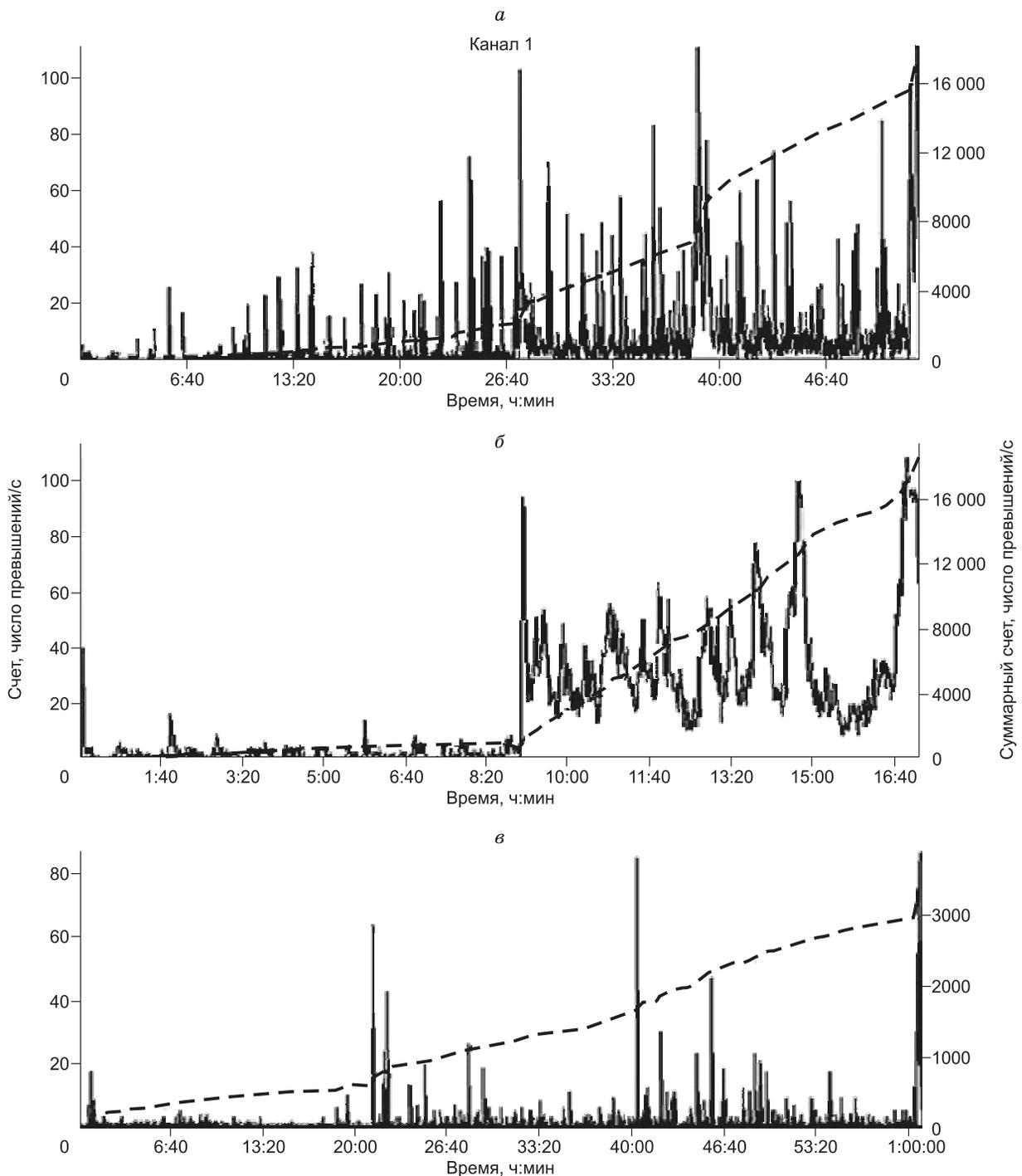


Рис. 5. Типы кривых АЭ при нагружении серпентинов.

а — обр. 8, *б* — обр. 10, *в* — обр. 9. Сплошная линия — счет, штриховая — суммарный счет.

нению с обр. 10 общее высокочастотное излучение выше почти в 1.5 раза, что, видимо, связано со значительным количеством разрушающихся волокон асбеста.

Для *второй генетической группы* (обр. 7, 9) типичен третий тип кривых (см. рис. 5, *в*). Здесь в основном получены импульсы с частотой от 500 кГц до 1 МГц с энергией 43 и 60 дБ, но количество их невелико. Также отмечается расширенный энергетический диапазон излучения при низких частотах. Общий уровень излучения очень низкий (минимальный из трех групп). В этой группе пород акустоэмиссионное излучение примерно в 2—3 раза ниже, чем в породах первой группы. На его фоне происходит сильное и резкое, очень кратковременное увеличение активности.

Для *третьей генетической группы* испытания проводились только на образцах с неориентированной структурой. Серпентиниты обр. 4 (Липовка) обладали самыми высокими параметрами АЭ среди изученных разновидностей как по энергии всех диапазонов, так и по количеству импульсов (несмотря на среднюю прочность образцов). Активность акустической эмиссии в этих породах несет в себе признаки всех рассмотренных выше типов.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленные различия в фазовом и химическом составе изученных образцов, а также различия их свойств позволяют предполагать, что и геологические условия их образования должны различаться. Обзор литературы, посвященной особенностям мантийных минералов [Соболев, 1974; Stephens, Dawson, 1977; Mitchell, 1995; Navon, 1998], показывает, что высокие содержания хрома в силикатах (оливин, пироксене) характерны для высокобарных парагенезисов. Основываясь на том, что наши серпентиниты наследуют химический состав первичных исходных минералов, мы можем предположить, что они образовались по разным протолитам. На основе химического состава серпентиниты были разделены на 3 группы.

Группа 1 (обр. 10, 8) — высокоглиноземистые ($Al_2O_3 > 0.6$ мас. %), высокохромистые ($Cr_2O_3 > 0.45$ мас. %) и средненикелистые (0.2—0.3 мас. % NiO). Серпентиниты этой группы имеют ультраосновные протолиты и формировались в условиях мантии.

Группа 2 (обр. 9, 7) — низкоглиноземистые ($Al_2O_3 < 0.1$ мас. %) и низкохромистые ($Cr_2O_3 < 0.05$ мас. %). Серпентиниты этой группы имеют карбонатные протолиты и формировались на небольших глубинах.

Группа 3 (обр. 14, 4) — среднеглиноземистые (Al_2O_3 от 0.3 до 0.5 мас. %) и низкохромистые ($Cr_2O_3 < 0.05$ мас. %). Серпентиниты этой группы имеют протолиты основного состава и формировались в коровых условиях.

Петрографические исследования показали, что изученные образцы различаются не только по минеральному и химическому составу, но и по текстурно-структурным особенностям. Среди них можно выделить две группы объектов. Первая группа — образцы с равномерно-зернистой микрокристаллической структурой, в которых преобладающей фазой является лизардит или антигорит. Вторая группа — образцы с неравномерно-зернистой структурой, в их строении отмечается или присутствие ориентированных трещин и прожилков, заполненных хризотилом, или значительные по размеру включения несиликатных фаз (карбонаты, опал). Эти структурно-текстурные различия отражаются на физических свойствах пород. Величины упругих констант прямо связаны со степенью сплошности пород, уровнем их раскристаллизации, минеральным составом, степенью метаморфизма и глубиной формирования (см. табл. 1).

Мы сравнили наши результаты с литературными данными [Bezacier et al., 2010]. Значения ν_p для наших образцов близки к значениям, полученным для агрегатов антигорита. Значения ν_s для наших образцов значительно ниже, чем измеренные ранее. Анизотропия тоже отличается. Особенно заметные отличия наблюдаются для обр. 4 и 10. Они связаны с присутствием опала (обр. 4) и многочисленными прослоями асбеста в лизардитовой матрице (обр. 10). Физические параметры антигоритсодержащих образцов (обр. 9, 7) близки к значениям, полученным методом Brillouin-спектроскопии. Данные показывают, что не всегда можно корректно сравнивать значения физических параметров из монокристаллических экспериментов с результатами измерений природных объектов, выполненных для огромных массивов пород.

Коэффициент Пуассона отражает деформационные свойства пород, и его величина в значительной степени определяется типом преобладающего минерала. Следует отметить, что значения μ_0 (0.3—0.4), полученные для изученных серпентинитов, по деформационным свойствам сближают их с породами, обладающими пластическими свойствами (глины, суглинки). Это хорошо вписывается в концепцию, согласно которой серпентиниты выполняли роль «смазки» при тектонических подвижках по разломам в районе ГУР.

Текстурно-структурные особенности пород, так же как и их минеральный состав, сложились в ходе долгой и сложной геологической истории Уральского региона. Проведенные реконструкции [Пучков и др., 1997, 2000] показывают, что в палеозойское время, начиная с силура, в зоне ГУР формируется зона поддвига литосферных плит. В результате этих тектонических движений структуры западного блока были погружены, подвинуты под структуры восточного блока. Изученные нами образцы отобраны в разных зонах Уральского хребта (см. рис. 1) и, соответственно, испытали различную тектоническую нагрузку, что и отразилось на свойствах серпентинитов.

Акустическую эмиссию связывают с процессом излучения материалом упругих волн, вызванных локальной динамической перестройкой его структуры, а также с нарушением связей на атомно-молекулярном уровне при силовом, температурном, электромагнитном и других воздействиях [Hardly, 1972].

Изучение АЭ используют для изучения эффектов памяти в горных породах [Панасьян, Петровский, 1984; Лавров и др., 2004; Lehtonen et al., 2012], при определении структурно-чувствительного коэффициента пород [Панасьян, Шварц, 2011] и при решении методических задач по исследованию параметров АЭ в различных по составу и строению минералах и горных породах [Panasiyan et al., 1990]. Эти исследования показали, что для пород с высокими деформационными свойствами (существенно отличающимися от металлов) эмиссионный скачок свидетельствует о подрастании уже существующих в породе микротрещин и межзерновых контактов, а также о возникновении новых локальных зон отрывов. Эти процессы на микроуровне сопровождаются низкочастотным излучением АЭ (характерным для процессов отрыва и трения), которое фиксируется на графиках зависимости энергии от времени по полосам частот. Получено подтверждение таких процессов методами томографии [Панасьян и др., 2014], и пока у нас нет доказательств о роли сдвиговых процессов.

Задачей наших исследований являлось выявление зависимости акустоэмиссионных свойств серпентинитов от структурных параметров образцов из зоны палеосубдукции. Сопоставление с литературными данными позволяет расшифровать выявленные отличия и связать их с конкретными текстурно-структурными особенностями изученных образцов и с характером тех напряжений, которые они испытали в ходе тектонической перестройки геологических структур Урала.

Изучение эффузивных пород (гавайские базальты) показало [Панасьян и др., 2012], что на типы излучения АЭ, вне зависимости от скорости подачи нагрузки, влияют состав вкрапленников, их размеры и состояние, строение основной массы, структура пород, заполнение пор. Те же закономерности выявлены и при изучении серпентинитов. В процессе проведения АЭ испытаний для каждого образца, даже изготовленного из одного генетического типа серпентинита, выявлены свои особенности развития активности АЭ (ΣN — число зарегистрированных импульсов АЭ за единицу времени [ГОСТ 27655-88]). Большое количество трещин, микрозернистость, корродированные минеральные контакты создают условия для постоянного низкочастотного излучения и расширенного низкочастотного энергетического диапазона. Все кривые характеризуются тремя участками: с отсутствием АЭ, с равномерным увеличением активности АЭ и со скачкообразным излучением АЭ. Эти участки неодинаково проявляются в разных образцах, что позволило разделить изученные серпентиниты по типам кривых эмиссии на несколько основных типов (см. рис. 5). Прослеживается четкая зависимость типа кривой от состава и структуры породы.

В первой генетической группе серпентинитов (условно мантийная группа) для всех образцов характеристика средне- и низкочастотных излучений практически одинакова как по количеству импульсов, так и по их максимальной энергии (см. рис. 5, а). Можно предположить, что в этот момент происходит разрушение кристаллов серпентина.

Во второй генетической группе на фоне относительно низкой акустической активности (вне зависимости от прочности породы) проявляются редкие пиковые значения количества событий в высокочастотном диапазоне, что можно связать с разрушением более крупных зерен карбонатов. Эта ситуация аналогична поведению гавайских базальтов, для которых типично присутствие неравномерно-распределенных вкрапленников оливина (15—30 %) в микрокристаллической основной массе.

В третьей генетической группе акустическая эмиссия имеет наиболее разнообразный характер. Возможно, что это связано с высокой железистостью первичного протолита, большим количеством рудных вкраплений и повышенной микро- и макротрещиноватостью породы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Комплексные минералого-петрофизические исследования серпентинитов, развитых по ультрабазитам, приуроченным к зоне Главного Уральского разлома — палеозойской субдукционной зоне, показывают, что изученные породы образованы в различных геологических условиях. Выделены три генетические группы серпентинитов, различающиеся по минеральному и химическому составам и по структурно-текстурным особенностям. Серпентиниты первой группы имеют мантийные протолиты ультраосновного состава. Серпентиниты второй группы имеют карбонатные протолиты и образованы в верхних слоях земной коры. Серпентиниты третьей группы имеют литосферные протолиты основного состава.

2. Полученные на основании проведенных исследований вариации главных физических параметров серпентинитов, включая прочностные свойства и величины скоростей продольных и поперечных волн, показывают, что не всегда можно корректно сопоставлять значения физических свойств минералов, полученные в экспериментах на монокристаллах с результатами измерений природных объектов, выполненных для огромных массивов пород.

3. Проанализированы результаты по изучению АЭ серпентинитов при нагружении с постоянной скоростью подачи нагрузки. Установлено, что в образцах различных генетических типов кривые АЭ

имеют разную форму, что обуславливается различиями их текстурно-структурных характеристик, приобретенных на магматической, метасоматической и экзогенной стадиях формирования. Для данного типа пород подобные эксперименты выполнены впервые.

ЛИТЕРАТУРА

Вализер П.М., Русин А.И., Краснобаев А.И., Лиханов И.И. Гранат-пироксеновые и лавсонитсодержащие породы максютовского комплекса (Южный Урал) // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (11), с. 1754—1772.

Варлаков А.С. Серпентины и серпентиниты Бакала и Сатки // Зап. ВМО, 2000, вып. 4, с. 89—94.

Вертушков Г.Н., Авдонин В.Н. Таблицы для определения минералов по физическим и химическим свойствам. М., Недра, 1992, 489 с.

Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. М., Недра, 2002, 695 с.

Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л. Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. М., Изд-во «Горная книга», 2008, 175 с.

Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филиппов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. М., Изд-во Моск. геол.-развед. ун-та, 2004, 436 с.

Панасьян Л.Л., Петровский М.А. Об использовании эффекта Кайзера для оценки напряжений в горных породах // Инженерная геология, 1984, № 2, с. 114—119.

Панасьян Л.Л., Шварц К.А. Опыт оценки структурно-чувствительного коэффициента с помощью акустической эмиссии // Сборник тр. науч. конф. «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV сессия РАО». Т. 1. М., 2011, с. 300—304.

Панасьян Л.Л., Ладьгин В.М., Курносое В.Б. Связь акустической эмиссии со структурами в базальтах Гавайских островов // Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геоакустика. Сборник тр. науч. конф. «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия РАО». Т. 1. М., ГЕОС, 2012, с. 349—353.

Панасьян Л.Л., Сас И.Е., Булыгина Л.Г., Чернов Н.С. Современный подход к оценке прочности скальных грунтов // Сергеевские чтения. Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе. Материалы годичной сессии научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 16. М., РУДН, 2014, с. 609—613.

Пучков В.Н. Тектоника Урала. Современные представления // Геотектоника, 1997, № 4, с. 42—61.

Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа, ГИЛЕМ, 2000, 146 с.

Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1974, 263 с.

Уразаев Б.М. Физические свойства горных пород и геофизические поля. Алма-Ата, Наука, 1971, 243 с.

Федоров Т.О., Расцветаев Л.М. Позднегерцинская структура осевого пояса Урала и ее геодинамическая интерпретация. М., Изд-во Моск. ун-та, 1998, с. 95—106.

ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. Введ. 1989-01-01.

Bezacier L., Reynard B., Bass J.D., Sanchez-Valle C., Van de Moortèle B. Elasticity of antigorite and seismic anisotropy of subduction zone // Abstracts of the IMA conference, Budapest, 2010.

Cherepetskaya E.B., In'kov V.N., Shkuratnik V.L. Laser ultrasonic spectroscopy for geological testing // Forum Acusticum, Budapest, 2005, p. 2789—2794.

Gemmi M., Merlini M., Fischer J., Poli S., Mugnaioli E., Kolb U. A new hydrated high pressure phase in the MASH system // Abstracts of the IMA conference, Budapest, 2010.

Hardly H.R. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research // Acoustic Emission, ASTM STP 505, American Society for Testing and Materials, 1972, p. 41—83.

Lehtonen A., Cosgrove J.W., Hudson J.A., Johansson E. An examination of «in situ» rock stress estimation using the Kaiser effect // Eng. Geol., 2012, № 124, p. 24—37.

Mitchell R.H. Kimberlite, orangite and related rocks. New York, Plenum Press, 1995, 410 p.

Murakami M. Sound velocities of Earth's deep materials // Abstracts of the IMA conference, Budapest, 2010.

Navon O. Diamond formation in the Earth's mantle // Proceedings of the VIIth International Kimberlite conference, 1998, v. 2, p. 584—604.

Panasiyan L.L., Kolegov S.A., Morgunov A.N. Stress memory studies in rocks by means of acoustic emission // International conference on mechanics of jointed and faulted rock, Vienna, Austria. Rotterdam, A.A. Balkema, 1990, p. 435—439.

Posukhova T.V., Panasian L.L., Cherepetskaya E.B., Sas I.E. Mineralogical features and properties of serpentine as indicator of the deep Earth subduction processes // J. Earth Sci. Eng., 2012, v. 2, p. 729—743.

Rosa A.D., Sanchez-Valle C., Wang J., Saikia A. Single-crystal elasticity of superhydrous phase B, $Mg_{10}Si_3O_{18}H_4$, by Brillouin scattering spectroscopy // Abstracts of the IMA conference, Budapest, 2010.

Speziale S., Marquardt H., Koch-Müller M., Marquardt K., Capitani G., Jahn S., Wilke M. High-pressure Brillouin and Raman spectroscopy of a natural antigorite single-crystal // European mineralogical conference. Frankfurt/Main, Germany, v. 1. 2012, EMC2012-557.

Stanke F.E., Kino G.S. A unified theory for elastic wave propagation on heterogeneous materials // J. Acoust. Soc. Amer., 1984, v. 75, p. 234—238.

Stephens W.E., Dawson J.B. Statistical comparison between pyroxenes from kimberlites and their associated xenoliths // J. Geol., 1977, v. 85, p. 433—449.

Strunz H., Nickel E.H. Strunz mineralogical tables: chemical-structural mineral classification system. Schweizerbart, 2001, 870 p.

Рекомендована к печати 24 января 2014 г.

М.И. Эповым

Поступила в редакцию

18 сентября 2013 г.