МЕТАПСЕВДОТАХИЛИТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЩЕЛОЧНОЙ ПОЛОСЫ ИЛЬМЕННО-ВИШНЕВОГОРСКОГО ПОЛИМЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

А. Б. Немов¹, Е. В. Медведева^{1,3}, В. А. Котляров²

¹Ильменский государственный заповедник, Миасс, ya.andrew808@yandex.ru

²Институт минералогии УрО РАН, Миасс

³Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Миасс

Среди милонитизированных пород Центральной щелочной полосы (ЦЩП) ильмено-вишневогорского полиметаморфического комплекса (ИВПК) впервые было обнаружено линзовидное тело (2 × 3 м) метапсевдотакхилита, сложенного сетью тонких прожилок псевдотакхилитового материала, секущих породу кварц-биотит-полевошпатового состава. Микроскопическое изучение текстурно-структурных особенностей показало наличие двух типов метапсевдотакхилитовых жил: ранние милонитизированные метапсевдотакхилиты и поздние метапсевдотакхилиты. В метапсевдотакхилитовом агрегате обнаружена Th-U-Y-REE-минерализация, представленная редкими минералами ряда *торогуммит-коффинит* и *фергусонит-(Y)* (REMMA-202 с LZ Link Systems с Si-Li-детектором). Состав метапсевдотакхилита соответствует граниту нормальной щелочности и фиксирует высокие концентрации легких REE и Th, U, Y (AAS и ICP-MS). Наличие разновозрастных метапсевдотакхилитов указывает на полистадийное преобразование вмещающих пород ЦЩП и фиксирует процесс частичного фрикционного плавления породы в условиях стресса на заключительных этапах становления комплекса.

Ключевые слова: метапсевдотакхилит, ильмено-вишневогорский полиметаморфический комплекс.

METAPSEUDOTACHYLITE FROM CENTRAL ALCALINE BAND OF ILMENY-VISNEVOGORSKY POLYMETAMORPHIC COMPLEX (SOUTH URALS)

A. B. Nemov¹, E. V. Medvedeva¹, V. A. Kotlyarov²

¹Ilmeny State Reserve, Miass

²Institute of Mineralogy UB RAS, Miass

³National Research South Ural State University, Miass Branch

For the first time, among Central Alkaline Band (CAB) mylonitic rocks of the Ilmeny-Vishnevogorsky polymetamorphic complex (IVPC) we found a lenticular body of quartz-biotite-feldspar composition (2 × 3 m) with complicated network of thin intersecting recrystallizing veins of metapseudotachylytes. Microscopic research of textural and structural features revealed the presence of two types of metapseudotachylyte veins: early mylonitized metapseudotachylytes and late metapseudotachylytes. In the metapseudotachylyte body discovered Th-U-Y-REE-mineralisation are represented by rare minerals of solid-solution series thorogummite-coffinite and fergusonite-(Y) (REMMA-202 LZ Link systems with Si-Li detector). The composition of the metapseudotachylyte corresponds to normal alkaline granite and has high concentrations of LREE and Th, U, Y (AAS and ICP-MS). The presence of heterochronous metapseudotachylytes indicates a multistage transformation of CAB host rocks, and records the process of partial frictional melting of the rock under stress, in the final stages of formation of the complex.

Keywords: metapseudotachylyte, Ilmeny-Vishnevogorsky polymetamorphic complex.

Введение

Псевдотакхилиты — это продукты экстремальных хрупких деформаций, мгновенно формирующиеся в результате дробления и частичного плавления горных пород [22]. Они представляют собой секущие жилы в горных породах, состоящие из стекловидного или тонкозернистого матрикса с включениями обломков минералов вмещающей породы. Преобразованные и перекристаллизованные разности псевдотакхилита названы метапсевдотакхилитами, а милонитизированные — милонитовыми метапсевдотакхилитами.

Ранее псевдотакхилиты как разновидность тектонитов на территории ИВПК не были описаны. Множество исследователей [2, 4–6, 8] отмечают широкое развитие процессов брекчирования, катаклазирования и милонитизации щелочных, карбонатно-силикатных и метаморфических пород комплекса, которые осложнены син- и посттектоническими процессами метасоматических преобразований (альбитизация, карбонатизация, биотитизация и т. д.). Термины «катаклазирование» и «милонитизация» нередко применялись к породам ИВПК ошибочно, без рассмо-

трения фактических текстурно-структурных особенностей пород. Изучение особенностей тектонитов ИВПК за последние 20 лет [1, 15, 20] позволило выявить в породах комплекса развитие меридиональных зон милонитизации, которые фиксируют региональную сдвиговую зону в пределах ИВПК. Современная классификация тектонитов [23] позволяет выделить среди пород ИВПК милониты, протомилониты, ультрамилониты [9, 11]. Обнаружение среди пород ЦЩП метапсевдотакхилитов расширяет количество разновидностей тектонитов и свидетельствует о развитии стресс-деформаций на заключительном этапе формирования комплекса.

Методы исследования

Текстурно-структурные особенности породы и соотношения минералов в них были исследованы на микроскопе Olympus BX 51. Состав петрогенных компонентов пород был определен атомно-абсорбционным методом (аналитики Л. Б. Лапшина, Н. В. Шаршуева; «ЮУЦКП», Миасс), редкоземель-

ные, редкие и рассеянные элементы — ICP-MS (аналитики К. А. Филиппова, М. С. Свиренко; «ЮУЦКП», Миасс). Химические анализы состава минералов выполнены на растровом электронном микроскопе «РЭММА-202 М» с энергодисперсионной приставкой LZ Link Systems с Si-Li детектором. Стандарты: AstJMEХ scientific Limited MJNM 25-53 Mineral Mount serial № 01-44. Режим съёмки: при разрешении детектора 160 эВ, ускоряющем напряжении 20—30 кВ, силе тока 3×10^{-3} А, диаметром пучка 1—2 мкм. Коррекция данных производилась с использованием программы Magellanes.

Геологическое положение

Комплекс щелочных пород ИВПК представлен Ильменогорским (на юге) и Вишневогорским (на севере) миаскитовыми массивами, соединенными Центральной щелочной полосой (ЦЩП) интенсивно дислоцированных щелочных пород сиенитового состава, включающую в себя тела карбонатитов, метасоматитов, а также глыбообразные (будинированные) тела метаморфических и магматических пород. В районе исследования (впадения р. Миасс в вдрх. Аргазь; рис. 1) ЦЩП имеет мощность 100—150 м, ограничи-

Рис. 1. Схема геологического строения: а — ильмено-вишневогорского полиметаморфического комплекса (Русин и др., 2006); б — Центральной щелочной полосы (Юрецкий и др., 1982).

1 — фенитовая оторочка; 2 — массивы миаскитов (O_2); 3 — нерасчлененные щелочные породы (O_2); 4 — массивы сиенитов (O_2); 5 — селяннинская серия амфибол-гнейсово-плаггиомигматитовая (AR-PR₁); 6 — бластомилониты гранитоидного и сиенитового состава (P₂-T₁(?)); 7 — милониты Кыштымского сдвига-надвига; 8 — еланчиковская толща плаггиосланцев и мигматитов инъекционного типа; 9 — саятовская серия, метатерригенная; 10 — зеленосланцевые осадочно-вулканогенные комплексы Западно-Магнитогорской и Арамилско-Сухтелинской зон; 11 — увильдинский монзонит-гранитный комплекс (Pz₃); 12 — гнейсовидные граниты Кисегачского комплекса; 13 — метатрафиты; 14 — поздние тектонические разломы; 15 — точка опробования

Fig. 1. Schematic geological maps: a — of the Ilmeny-Vishnevogorsky polymetamorphic complex, after (Rusin et al., 2006); b — Central alkaline band, after (Yuretskiy et al., 1982).

1 — fenite; 2 — Middle Ordovician miaskite massifs; 3 — Middle Ordovician indefinite alkaline rocks (O_2); 4 — Middle Ordovician syenite massifs (O_2); 5 — Selyankino Group: Archean to Early Proterozoic amphibolite-gneiss-plagiomigmatite rocks; 6 — Middle Permian-Lower Triassic (?) granitic and syenitic blastomylonites; 7 — mylonites of Kyshtym shear-thrust; 8 — Elanchik Sequence: plagioshales and injection migmatites; 9 — Saitovo Sequence: metaterrigenous rocks; 10 — greenschist volcanosedimentary complexes of West Magnitogorsk and Aramil-Sukhteli zones; 11 — Upper Precambrian Uvildy monzogranitic complex; 12 — gneissic granites Kisekach complex; 13 — metaultramafic rocks; 14 — late faults; 15 — the place of sample

ваясь с запада цепью тел миаскитов, а с востока — фенитов, вмещающими для которых служат породы селянжинской толщи [6]. Все породы интенсивно милонитизированы [1, 4].

Объект исследования

Линзовидное тело меланократовых пород (3×2 м) кварц-биотит-полевошпатового состава, осложненного сетью трещинок, по которым развивается метасевдотахилит, расположено среди пород сиенитового состава, представленных перемежающимися линзовидными телами милонитизированных миаскитов, сиенитов и фенитов неясного генезиса. Граница с вмещающими породами четко выражена. Структурно-текстурные особенности вмещающих пород свидетельствуют о развитии в них хрупко-пластичных деформаций, соответствующих условиям формирования от амфиболитовой до зеленосланцевой фазии метаморфизма на этапе 270–240 млн лет [20, 9, 11].

Порода кварц-биотит-полевошпатового состава, вмещающая метасевдотахилиты, имеет мелкозернистую структуру, тонкопрожилковую текстуру. Метасевдотахилиты имеют тонкозернистую структуру.

Минеральный состав: альбит — 65–80 %, К-На-полевой шпат — 10–15 %, кварц — 5–7 %, слюда ряда *аннит-флогопит* — 5–8 %, акцессорные минералы (ильменит, апатит, кальцит, циркон, титаномагнетит, коффеинит-торогуммит, фергусонит-(Y)) — 3–5 %.

Метасевдотахилитовые жилки состоят из тонкозернистого материала матрикса кварц-биотит-альбитового состава и тонкодисперсных частиц рудных минералов, характеризуются скрытокристаллической структурой с элементами порфирокластовой, текстура преимущественно флюидальная, местами милонитовая. Эти породы являются продуктом частичного фрикционного плавления вмещающей их

породы в условиях стресса [14, 16, 23] и содержат фрагменты ранее образованных катаклазированных зерен.

Текстурно-структурные особенности породы

Матрикс породы представлен катаклазированными зернами полевых шпатов размером 0.001–2 мм, часто обнаруживаются крупные катакласты (до 2 мм) сложенные мелкими зернами альбита (рис. 3, а), реже они сложены ильменитом, титаномагнетитом (0.02–0.5 мм), биотитом (до 0.5 мм) и цирконом (до 0.02 мм). Крупные катакласты полевых шпатов погружены в тонкозернистый перекристаллизованный агрегат альбита, биотита, кальцита и рудных минералов (0.05 мм и менее). Ориентировка минералов плохо различима, но фрагментарно проявляется линейность.

Метасевдотахилитовые жилки мощностью от 0.02 до 0.3–10 мм имеют сложную форму, образуют затеки, складки, вздутия, реже встречаются более тонкие жилки секущего характера (рис. 3, б). Материал более крупных метасевдотахилитовых жилок представлен тонкозернистым агрегатом, включающим в себя катаклазированные и перекристаллизованные зерна полевых шпатов, биотита, кварца, рудных и акцессорных минералов. В них формируются милонитовые структуры с CS-плоскостями, образованные ориентированными катакластами полевых шпатов (0.05–0.01 мм), и порфирокласты, нередко имеющие структуру «ядро—оболочка» σ -типа (рис. 3, с, d). Здесь же отмечаются асимметричные складки, образованные тонкозернистыми и пластично-деформированными зернами полевых шпатов, кварца и рудных минералов. Псевдотахилитовый материал отчетливо маркируется пылеватыми зернами рудных минералов и биотита.

В тонких метасевдотахилитовых жилках отмечается только линейная ориентировка зерен минералов (С-плоскость). Вся порода вместе с жилками метасевдотахилитов осложнена сетью поздних микро-трещин со смещением (зеркала скольжения; рис. 3, е) и трещин, заполненных ксеноморфными агрегатами рудных минералов (рис. 3, f).

Минеральный состав метасевдотахилита

Калиевый полевой шпат (0.5–2 мм) по составу соответствует ортоклаз-микроклину с примесью Ва (до 0.01 к. ф.). Плагиоклаз (0.01–0.5 мм) представлен олигоклаз-альбитом (An 3–11). Темная слюда группы биотита соответствует флогопиту: в метасевдотахилитовых жилках образует мелкие зерна (0.01–0.03 мм), а в матриксе с катакластами встречаются индивиды до 0.2 мм. Слюда ряда *аннит—флогопит* (f 44–50 %) содержит Ti (до 0.11 к. ф.), характеризуется полным отсутствием примесей Mn, Ca и Fe^{3+} . Акцессорные минералы — ильменит и титаномагнетит, которые образуют тонкодисперсную вкрапленность в метасевдотахилитовом жильном агрегате. Ильменит представлен двумя генерациями: I — гипидиоморфными зернами с низким содержанием MnO (0.54–3.62 мас. %) и примесью Nb_2O_5 (0.60–

Рис. 2. Метасевдотахилит кварц-биотит-полевошпатового состава

Fig. 2. Metapseudotachylyte of quartz-biotite-feldspar composition

Рис. 3. Микрофотографии текстурно-структурных особенностей породы: а) порфирикласт К-Na-полевого шпата, замещаемого альбитом в матриксе (с анализатором); б) пересечение ранней метапсевдотачилитовой жилки (1) с фрагментом матрикса (2) с поздней жилкой метапсевдотачилита (3) (без анализатора); в) CS-плоскости полосчатости (хрупко-пластичного течения), асимметричные микроскладки (1) и σ -порфирикласты (2) (без анализатора); д) то же (с анализатором); е) серия микросдвигов (1) в метапсевдотачилитовой жилке (без анализатора); ф) метапсевдотачилитовая жилка (1), пересеченная поздней трещиной (2) с рудным веществом (без анализатора)

Fig. 3. Micrographs of textural and structural features of metapseudotachylyte's: а) porphyroblast K-Na feldspar is replaced by albite in the matrix (with analyzer); б) intersection early of the metapseudotachylyte's vein (1) with a fragment of the matrix (2) and with late vein of the metapseudotachylyte (3) (without analyzer); в) CS-planes of foliation (brittle-plastic flow), asymmetric folds (1) and σ -porphyroclasts (2) (without analyzer); д) too (with analyzer); е) a series of microfaults (1) in the metapseudotachylyte's vein (without analyzer); ф) metapseudotachylyte's vein (1) crossed late fracture (2) with ore minerals (without analyzer)

1.10 мас. %); II — ксеноморфными агрегатами с концентрацией MnO до 5.23 мас. %. Кальцит образует ксеноморфные агрегаты (0.05—2 мм), расположенные в межзерновом пространстве рудных минералов, а также тонкие жилки в метапсевдотачилите. Для кальцита характерно повышенное содержание MnO (1.53—1.57 мас.%) и незначительная примесь FeO (0.79—0.88 мас. %), SrO (0.66—0.82 мас. %). Апатит представлен отдельными редкими фрагментами зерен размером 0.01—0.02 мм. Циркон — призматическими трещиноватыми зернами и обломками индивидов (0.05—1 мм), образующими иногда сростания с олигоклазом и ортоклаз-микроклином. В его составе присутствует примесь Hf до 0.02 к. ф. Титанит обнаружен в виде единичных обломков зерен (0.05—1 мм).

Фергусонит-(Y) ($Y_{0.46}Gd_{0.15}Sm_{0.06}Er_{0.04}Dy_{0.04}Ca_{0.04}Nd_{0.04}Ti_{0.04}U_{0.04}Yb_{0.03}Fe^{+2}_{0.02}Th_{0.01}Tb_{0.01}Ho_{0.01})_{0.99}Nb_{1.01}O_{4.00}$ приурочен к скоплениям ксеноморфных зерен ильменита в метапсевдотачилитовых жилках, где наряду с ильменитом присутствует тонкозернистый рекристаллизованный агрегат кварца и полевых шпатов. Сумма РЗЭ в этом минерале достигает 25 мас. %. Минералы ряда *торогуммит—коффинит* образуют ксеноморфные катаклазированные зерна размером 1—30 мкм, которые наряду с рекристаллизованными зернами полевых шпатов, новообразованного альбита и катаклазированных зерен рудных минералов (ильменит, титаномagnetит) формируют хаотично расположенные жилки. Формулы минералов отражают вариативность составов: $(Th_{0.84}U_{0.06}Pb_{0.02})_{0.92}Si_{1.08}O_{4.00} \cdot 4n$ (ОН) — торогуммит, $(Th_{0.53}U_{0.37}Pb_{0.09}Fe^{+2}_{0.04}Ca_{0.04})_{1.07}$

$\text{Si}_{0.93}\text{O}_{4.00} \cdot 4\text{n}(\text{OH})$ — коффинит. Содержание воды в них колеблется от 4.34 до 7.12 мас. %. Максимальные концентрации UO_2 — 27.9—29.0 мас. % — соответствуют 36.1 mol % коффинита в торите.

Представительные анализы химических составов основных породообразующих и аксессуарных минералов представлены в табл. 1, 2.

Петрогеохимическая характеристика породы

Химический состав породы (табл. 3) соответствует граниту нормальной щелочности [13]. Вмещающие милонитизированные сиениты соответствуют ряду *монцит—сиенит—нефелиновый сиенит (миаскит)*

Таблица 1. Химический состав породообразующих минералов из метапсевдотакхилита (мас. % и к. а. ф.)

Table 1. Chemical composition of rocksforming minerals from the metapseudotachylyte (wt. %, f. u.)

№ п/п	Ab		Kfs		Bt		Cal	
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO_2	66.95	65.19	65.23	65.09	39.78	41.20	—	—
TiO_2	—	—	—	—	1.86	1.76	—	—
Al_2O_3	19.91	21.28	18.80	18.81	14.58	15.79	—	—
FeO	0.14	0.14	0.06	0.14	18.21	19.01	0.79	0.88
MnO	—	—	—	—	—	—	1.57	1.53
MgO	—	—	—	0.11	12.83	10.59	—	—
CaO	0.59	2.28	—	0.42	—	—	53.11	53.15
Na_2O	11.51	10.23	3.05	2.93	—	—	—	—
K_2O	0.14	0.18	12.54	11.70	9.01	8.63	—	—
BaO	0.39	0.15	—	—	—	—	—	—
SrO	—	—	—	—	—	—	0.66	0.82
CO_2	—	—	—	—	—	—	43.50	43.40
e	99.24	99.30	100.07	99.35	96.27	96.98	99.64	99.77
Si	2.95	2.89	2.98	3.00	3.01	3.11	—	—
Ti	—	—	—	—	0.11	0.10	—	—
Al	1.03	1.11	1.01	1.02	1.30	1.40	—	—
Fe^{3+}	0.01	0.01	0.00	0.01	1.15	1.20	—	—
Fe^{2+}	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01
Mn	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01
Mg	—	—	—	0.01	1.44	1.19	—	—
Ca	0.03	0.11	—	0.02	—	—	0.58	0.58
Na	0.98	0.88	0.27	0.26	—	—	—	—
K	0.01	0.01	0.73	0.69	0.87	0.83	—	—
BaO	0.01	0.00	—	—	—	—	0.00	0.00
SrO	—	—	—	—	—	—	—	—
CO_2	—	—	—	—	—	—	0.40	0.39
*f	—	—	—	—	0.44	0.50	—	—

Таблица 2. Химический состав аксессуарных минералов из метапсевдотакхилита (мас. % и к. а. ф.)

Table 2. Chemical composition of accessory minerals from the metapseudotachylyte (wt. %, f. u.)

№ п/п	Zrn	Ilm		Frg-(Y)			Cof-Thrh		Thrh
	9	10	11	12	13 (°)	14	15 (a)	16 (b)	17 (c)
SiO_2	31.90	—	—	—	—	—	16.37	16.52	20.35
TiO_2	—	52.18	49.90	1.00	1.18	1.00	—	—	—
FeO	—	—	—	0.28	0.63	0.50	0.86	0.27	—
MnO	—	0.54	5.32	—	—	—	—	—	—
CaO	—	—	—	0.83	0.82	0.84	0.73	0.17	—
ZrO_2	64.54	—	—	—	—	—	—	—	—
HfO_2	2.61	—	—	—	—	—	—	—	—
Nb_2O_5	—	1.07	—	48.23	48.10	48.59	—	—	—
Y_2O_3	—	—	—	18.53	18.68	18.65	—	—	—
Nd_2O_3	—	—	—	2.57	2.36	2.21	—	—	—
Sm_2O_3	—	—	—	3.63	3.54	3.99	—	—	—
Gd_2O_3	—	—	—	9.65	9.11	10.06	—	—	—
Tb_2O_3	—	—	—	0.75	0.36	0.51	—	—	—
Dy_2O_3	—	—	—	3.02	2.73	2.83	—	—	—

	Zrn	Ilm	Frg-(Y)	Cof-Thrh	Thrh
Ho ₂ O ₃	—	—	0.52	—	—
Er ₂ O ₃	—	—	2.77	—	—
Yb ₂ O ₃	—	—	2.08	—	—
PbO	—	—	—	6.10	1.39
ThO ₂	—	—	0.56	40.82	69.10
UO ₂	—	—	3.25	28.98	4.82
е	99.05	99.79	97.34	93.87	95.66
Si	0.99	—	—	0.93	1.09
Ti	—	1.01	0.04	—	—
Fe ³⁺	—	—	0.01	0.04	—
Fe ²⁺	—	0.98	—	—	—
Mn	—	0.01	—	—	—
Mg	—	—	—	—	—
Ca	—	—	0.04	0.04	—
ZrO ₂	0.98	—	—	—	—
HfO ₂	0.02	—	—	—	—
Nb ₂ O ₅	—	—	1.03	—	—
Y ₂ O ₃	—	—	0.45	—	—
Nd ₂ O ₃	—	—	0.04	—	—
Sm ₂ O ₃	—	—	0.06	—	—
Gd ₂ O ₃	—	—	0.15	—	—
Tb ₂ O ₃	—	—	0.01	—	—
Dy ₂ O ₃	—	—	0.05	—	—
Ho ₂ O ₃	—	—	0.01	—	—
Er ₂ O ₃	—	—	0.04	—	—
Yb ₂ O ₃	—	—	0.03	—	—
PbO	—	—	—	0.09	0.02
ThO ₂	—	—	0.01	0.53	0.84
UO ₂	—	—	0.03	0.37	0.06

Примечание. Ab — альбит; Bt — биотит; Cal — кальцит; Cof — коффинит; Frg-(Y) — фергусонит иттревый; Ilm — ильменит; Kfs — K — Na — полевой шпат; Thrh — торогуммит; Zrn — циркон. «—» — не обнаружено. Примеси, мас. % — к. ф. (РЭММА-202, аналитик В. А. Котляров).

Note. Ab — albite; Bt — biotite; Cal — calcite; Cof — coffinite; Frg-(Y) — yttrium fergusonite; Ilm — ilmenite; Kfs — K-Na — fieldspar; Thrh — throgummite; Zrn — zircon. «—» — not determined. Trace elements, wt. % — f. u. (REMMA-202, analyst V. A. Kotlyarov).

Таблица 3. Представительные анализы химического состава метапсевдотахилита (1) и вмещающих апомиаскитовых милонитов (2—5; мас. %, г/т)

Table 3. Representative analyses of chemical composition of metapseudotachylyte (1) and the host rock of mylonitic miaskites (2—5; wt. %, ppm).

	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
SiO ₂	70.34	57.02	55.87	54.43	59.06	Eu	1.51	0.99	0.92	0.87	1.06
TiO ₂	0.35	0.72	0.6	0.65	0.82	Gd	8.34	2.32	2.41	2.27	2.77
Al ₂ O ₃	13.47	22.05	20.88	22.38	19.7	Tb	1.33	0.34	0.38	0.35	0.34
FeO	1.73	1.92	1.92	1.74	1.94	Dy	6.80	1.70	1.81	1.64	1.51
Fe ₂ O ₃	1.54	0.72	1.43	1	1.21	Ho	1.18	0.29	0.30	0.30	0.31
MnO	0.06	0.13	0.1	0.09	0.11	Er	3.15	0.85	0.92	0.94	0.94
MgO	0.33	0.56	0.56	0.42	0.36	Tm	0.45	0.13	0.13	0.12	0.12
CaO	2.48	2	2.69	2.08	1.36	Yb	2.53	0.73	0.82	0.81	0.77
Na ₂ O	6.35	6.68	6.16	6.94	4.96	Lu	0.36	0.10	0.11	0.123	0.10
K ₂ O	0.66	5.18	7.64	7.3	8.85	Be	3.13	0.13	0.79	1.31	1.00
P ₂ O ₅	0.14	0.21	0.21	0.14	0.05	V	25.1	58.2	55.5	55.0	59.5
П.п.п	2.24	2.56	2.16	2.3	1.54	Cr	61.1	11.2	7.80	16.8	6.58
Sum.	99.69	99.75	100.22	99.47	99.96	Co	2.26	2.31	2.17	1.66	6.39
La	88.2	22.6	44.1	38.3	38.2	Ni	55.2	3.97	26.0	5.52	65.0
Ce	166	47.8	89.6	78.9	77.1	Cu	35.7	8.57	18.1	7.84	42.4
Pr	17.5	5.37	8.77	7.96	7.53	Zn	6.20	29.0	54.6	41.2	261
Nd	59.9	20.5	27.5	25.6	21.9	Rb	13.6	70.7	101	85.7	82.9
Sm	9.79	2.96	3.30	2.92	2.78	Ba	167	3180	981	660	832

	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
Sb	1.57	0.33	1.22	0.59	2.68	Sr	655	2310	1442	1189	1240
Hf	2.27	0.45	0.80	0.29	0.22	Y	33.2	8.96	9.56	9.33	8.23
Ta	1.53	7.81	5.92	4.55	3.21	Zr	71.9	14.8	30.9	11.9	10.5
W	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	Nb	55.1	205	130	110	92.7
Pb	12.4	2.02	6.14	4.94	16.6	Mo	8.07	<0.03	<0.03	0.46	2.57
Th	29.3	0.18	2.35	1.92	2.57	Cd	0.43	0.09	0.24	0.08	0.11
U	6.71	2.23	2.11	1.69	1.40	Sn	0.98	0.97	1.38	0.83	4.10

субщелочной и щелочной серий, с вариациями содержания $\Sigma\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 9–14 мас. % и соотношением $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 0.27–1.29. Для состава метасевдотахилитов характерны более высокие содержания кремнезема и меньшие глинозема, чем во вмещающих милонитизированных сиенитах.

Суммарное содержание REE в метасевдотахилите (374 г/т) превышает их концентрацию во вмещающих милонитизированных сиенитах (106–181 г/т) в среднем в два раза. Характер распределения REE в этих породах отражает превалирование концентраций LREE над HREE (рис. 4, а). Фиксируется отрицательная европиевая аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.51$). Характер распределения мультиэлементов близок к коровому. Однако отмечены повышенные относительно коровых концентрации отдельных высокозарядных элементов (HFSE) — Pb, U, Th, Nb, Y и Ho. На фоне вмещающих милонитизированных миаскитов отражены повышенные концентрации HFSE — Sc, U,

Th, Zr, Hf, Y, Pb и транзитных элементов — Cr, Ni, Cu, фиксируются низкие содержания LILE — Ba, Sr, Rb, а также Ta, Nb (HFSE) и V (рис. 4, б). Соотношение Zr/Hf в метасевдотахилите — 31, а во вмещающих милонитизированных миаскитах варьирует от 30 до 50. Соотношение Th/U (4.4) выше, чем во вмещающих породах (0.1–1.8).

Обсуждение результатов

Текстурно-структурные особенности исследуемой породы (наличие микроразрывных нарушений в виде метасевдотахилитовых жилок и их апофизов, имеющих резкую границу с вмещающей породой; «пылеватых» мелкофрагментированных остатков рудных минералов в жилках; тонкокристаллического перекристаллизованного (метаафанитового) материала, образующего разрывные жилки) указывают на тектоническую трансформацию породы при экстремальных хрупких и мгновенных деформациях, в результате ее дробления и фрикционного плавления в зоне разлома [3, 22], что позволяет классифицировать породу как метасевдотахилит, образованный по породе гранитоидного состава. Петрографическое исследование породы выявило два типа метасевдотахилитов: 1) крупные по мощности жилки с СS-плоскостями милонита и σ -типом порфиорокlastов, которые соответствуют милонитизированным метасевдотахилитам [19]; 2) небольшие по мощности жилки с линейной полосчатостью (С-плоскостью), соответствующие метасевдотахилитам, которые, в свою очередь, секут милонитизированные метасевдотахилиты, что указывает на их более позднее происхождение.

В условиях сдвиговых деформаций под влиянием флюида [20] в метасевдотахилитах [19], как и в милонитах [10, 21], может происходить перераспределение элементов-примесей, как LILE (Rb, Ba, Sr и др.), так и HFSE (Th, U и др.), влекущее образование редкометалльной акцессорной минерализации с высокими содержаниями перераспределенных элементов (фергусонит-(Y), ильменит, торогуммит-коффинит) и концентрацией их в ослабленных микроразрывах — метасевдотахилитовых жилках, при формировании индуцированного микрорасплава. Близкие параметры коэффициента Zr/Hf во вмещающих милонитизированных миаскитах и метасевдотахилите свидетельствуют о единстве процесса преобразования пород, протекающего под влиянием флюида, обеспечивающего массоперенос, в том числе и HFSE [17].

Существенное отличие в соотношении Th/U в метасевдотахилите и вмещающих породах, а также соотношения таких петрогенных компонентов, как SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , позволяют предположить, что

Рис. 4. Диаграммы распределения редкоземельных (а) и редких (б) элементов. Условные обозначения: 1 — метасевдотахилит; 2 — вмещающие апомиаскитовые милониты; BK — верхняя кора; KK — континентальная кора

Fig. 4. Diagrams of distribution REE (a) and TE (b). Legend: 1 — metasevdotachylyte; 2 — host-rocks apomiaskite mylonite; BK — upper crust; KK — continental crust

основным материалом для образования метапсевдотахилита могло быть тело альбитита. С альбититами часто связана U-Th-минерализация (тороугмит-коффинит). В породах ИВПК формирование тел альбититов происходило под влиянием флюида на постколлизийном этапе становления комплекса в связи с формированием региональной сдвиговой зоны. Синтектоническая альбитизация в изученной породе протекала в условиях хрупко-пластичных деформаций милонитового горизонта [19], а затем, при дальнейшей эксгумации, в зоне хрупких деформаций и катаклазе пород, сопровождающемся образованием псевдотахилитовых жил. В строении этих метапсевдотахилитовых тел фиксируются как хрупкие (образование трещин разрыва), так пластичные (милонитовая структура, образованная CS -плоскостями сдвига, ассиметричные складки, σ -тип порфиорокlastов) деформации [19], связанные с мгновенным стрессом в сейсмогенной зоне.

Эпитаксиальное срастание фергусонита с ильменитом-П, который характеризуется высоким содержанием Mn и отсутствием примесей Nb, что характерно для состава поздних ильменитов, связанных с метасоматически измененными (альбитизированными) апомиаскитовыми и апосиенитовыми милонитами ИВПК [12], также указывает на процесс синтектонической альбитизации.

Выводы

Впервые среди пород ИВПК обнаружена порода метапсевдотахилит, являющаяся продуктом частичного плавления за счет трения в диапазоне температур 1200–1450 °C [14] на различных глубинах в интервале от 1 до 40 км [16].

Тектурно-структурные особенности показали наличие двух типов метапсевдотахилитовых жил: ранних милонитизированных метапсевдотахилитов и поздних метапсевдотахилитов.

Минералого-геохимические особенности породы свидетельствуют о широком влиянии глубинного флюида, способствующего массопереносу вещества как крупноионных литофильных элементов (LILE), так и высокозарядных (HFSE).

Литература

1. Ворожук Д. В. Полевые шпаты гранитоидных бластомилонитов: микроструктурные особенности и вариации химического состава // Ежегодник-2000. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. С. 102–110.
2. Заварицкий А. Н. Геологический и петрографический очерк Ильменского минералогического заповедника и его копей. М.: Главн. упр. по заповедн., 1939. 196 с.
3. Кирмасов А. Б. Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.
4. Кошевой Ю. Н. История формирования и структурная эволюция Ильменского комплекса: Рукопись. Фонды ИГЗ. 1985. 313 с.
5. Левин В. Я. Щелочная провинция Ильменских-Вишневых гор. М.: Наука, 1974. 221 с.
6. Левин В. Я., Роненсон Б. М., Самков В. С., Левина И. А., Сергеев Н. С., Киселёв И. П. Щелочно-карбонатные комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 244 с.
7. Левицкий В. И. Петрология и геохимия метасоматоза при формировании континентальной коры // Новосибирск: Гео, 2005. 340 с.
8. Ленных В. И., Вализер П. М. К геологической схеме Ильменского комплекса // Геология и минералогия Ильменского комплекса: ситуация и проблемы. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2006. С. 20–27.
9. Медведева Е. В., Немов А. Б., Котляров А. В. Милонитизированные породы Ильменского комплекса (Ю. Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2013. № 11. С. 7–10.
10. Медведева Е. В., Немов А. Б., Котляров А. В. Новые данные о милоните основного состава из Ильменского миаскитового массива (Южный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 6. С. 16–24.
11. Немов А. Б. Структурно-текстурные особенности миаскитовых милонитов Ильменского массива (Южный Урал) // геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геолог. съезда Респ. Коми, Сыктывкар, 15–17 апр. 2014 г. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. Т. 2. С. 116–119.
12. Немов А. Б. Манганоильменит и пиррофанит из сиенитов Ильмено-вишневогорского щелочного комплекса (Южный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2017. № 5. С. 14–19.
13. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. 200 с.
14. Родыгин А. И. Динамометаморфические горные породы. Томск: Изд-во Томского унта. 2001. 356 с.
15. Русин А. И., Краснобаев А. А., Русин И. А., Вализер П. М., Медведева Е. В. Щелочно-ультраосновная ассоциация Ильменских-Вишневых гор // Геохимия, петрология, минералогия и генезис щелочных пород: Материалы всерос. совещания. Миасс: ИМин УрО РАН. 2006. С. 222–227.
16. Скляров Е. В., Гладкочуб Д. П., Донская Т. В., Мазукабзов А. М., Сизых А. И., Буланов В. А. Метаморфизм и тектоника: Учеб. пособие для вузов. М.: Интернет-Инжиниринг, 2001. 216 с.
17. Шикина Н. Д., Тагиров Б. Р., Волченкова В. А., Бычкова Я. В. Zr/Hf-отношение в сверхкритических хлоридных флюидах: экспериментальное изучение комплексобразования циркония и гафния при 450 °C, 0.6–1 кбар // Петрология. 2015. Т. 23. № 1. С. 101–110.
18. Юрецкий В. Н., Петров В. И., Кузнецов Г. П., Левин В. Я., Пунегов Б. Н. и др. Отчет Ильменского геологосъемочного отряда о результатах геологического доизучения масштаба 1 : 50000 Ильменской площади. Челябинск: ПГО «Уралгеология», ЧГРЭ, 1982.
19. Allen J. L., Shaw C. A. Seismogenic structure of a crystalline thrust fault: Fabric anisotropy and coeval pseudotachylite-mylonitic pseudotachylite in the Grizzly Creek shear zone, Colorado // Geological Society, London, Special Publications. 2011. V. 359. No. 1. pp. 135–151.
20. Hetzel R., Glodny J. A crustal-scale, orogen-parallel strike-slip fault in the Middle Urals: age, magnitude of displacement, and geodynamic significance // international Journal of Earth Sciences. 2002. V. 91, No. 2. pp. 231–254.
21. O'Hara K., Blackburn W. H. Volume-loss model for trace-element enrichments in mylonites // Geology. 1989. V. 17. No. 6. pp. 524–527.
22. Spray J. G. Pseudotachylite controversy: Fact or friction? // Geology. 1995. T. 23. № 12. С. 1119–1122.
23. Trouw R. A. J., Passchier C. W., Wiersma D. J. Atlas mylonites and related microstructures. Springer, 2010. 322 pp.

References

- Voroschuk D. V. *Polevye shpaty granitoidnykh blastomilonitov: mikrostrukturnye osobennosti i variatsii khimicheskogo sostava* (Feldspars of granitoid blastomylonites: microstructural features and variations of chemical composition). *Ezhгодnik-2000*. Ekaterinburg: IGG UB RAS, 2001, pp. 102–110.
- Zavaritskiy A. N. *Geologicheskii i petrograficheskii ocherk Il'menskogo mineralogicheskogo zapovednika i ego kopey* (Geological and petrographic sketch of the Ilmensky Mineralogical Reserve and its mines). Moscow: Main Directorate for Reserves, 1939, 196 pp.
- Kirmasov, A. B. *Osnovy strukturnogo analiza* (Basis of structural analysis). Moscow: World of Science, 2011, 346 pp.
- Koshevoy Yu. N. *Istoriya formirovaniya i strukturnaya evolyutsiya il'menogorskogo kompleksa* (History of formation and structural evolution of Ilmenogorsky complex). Manuscript. Miass: Ilmenskiy gosudarstvenniy Zapovednic Akademii nauk SSSR, 1985. 313 p.
- Levin V. Ya. *Shelochnaya provintsiya Il'menskikh-Vishnevskikh gor* (Alkaline province of Ilmen-Vishnevaya mountains). Moscow: Nauka, 1974, 221 p.
- Levin V. Ya., Ronenson B. M., Samkov V. S., Levina I. A., Sergeev N. S., Kiselev I. P. *Shchelochno-karbonatitovye komplekсы Urala* (Alkaline-carbonatite complexes of the Urals). Ekaterinburg: Uralgeolkom, 1997, 244 pp.
- Levitskiy V. I. *Petrologiya i geokhimiya metasomatoza pri formirovanii kontinental'noy kory* (Petrology and geochemistry of metasomatism in the formation of the continental crust). Novosibirsk: Geo, 2005, 340 pp.
- Lennyh V. I., Valizer P. M. *K geologicheskoy skheme Il'menogorskogo kompleksa* (To the geological scheme of Ilmenogorsk complex). *Geologiya i mineralogiya Il'menogorskogo kompleksa: situatsiya i problemy*. Miass: IGZ UB RAS, 2006, pp. 20–27.
- Medvedeva E. V., Nemov A. B., Kotlyarov A. V. *Milonitizirovannye porody il'menogorskogo kompleksa (Yu. Ural)*. (Mylonized rocks of the Ilmenogorsky complex (Yu. Ural)). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, Syktyvkar, 2013, No. 11, pp. 7–10.
- Medvedeva E. V., Nemov A. B., Kotlyarov A. V. *Novye dannye o milonite osnovnogo sostava iz Il'menogorskogo miaskitovogo massiva (Yuzhnyy Ural)* (New data about mafic mylonite from Ilmenogorsky miaskite massive (South Urals)). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, Syktyvkar, 2018. No. 6. pp. 16–24.
- Nemov A. B. *Strukturno-teksturnye osobennosti miaskitovykh milonitov Il'menogorskogo massiva (YUzhnyy Ural)* (Structural-textural features of mylonites Ilmenogorsky miaskite massif (South Urals)). *Geologiya i mineral'nye resursy Evropejskogo severo-Vostoka Rossii: materialy XVI. Geolog. s'ezda resp. Komi*, Syktyvkar, 15–17 apr. 2014 g. Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 2014, V. 2, pp. 116–119.
- Nemov A. B. *Manganoil'menit i pirofanit iz sienitov il'meno-vishnevogorskogo shelochnogo kompleksa (Yuzhnyy Ural)* (Manganoilminite and Pyrophanite from syenites of Ilmeno-Vishnevogorsky alkaline complex (South Urals)). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, Syktyvkar, 2017. No. 5. pp. 14–19.
- Petrograficheskii kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* (Petrographic codex of Russian. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formation). Saint Petersburg: 2008, VSEGEI, 200 p.
- Rodygin A. I. *Dinamometamorficheskie gornye porody* (Dynamometamorphic rocks) // Tomsk: Tomsk University, 2001, 356 p.
- Rusin A. I., Krasnobaev A. A., Rusin I. A., Valizer P. M., Medvedeva E. V. *Shchelochno-ul'traosnovnaya assotsiatsiya Il'menskikh-Vishnevskikh gor* (Alkaline-ultrabasic association of the Ilmen-Vishnevsky mountains). *Proceedings of conference Geochemistry, petrology, mineralogy and genesis of alkaline rocks*. Miass: IM UB RAS, 2006, pp. 222–227.
- Sklyarov E. V., Gladkochub D. P., Donskaya T. V., Mazukabzov A. M., Silykh A. I., Bulanov V. A. *Metamorfizm i tektonika* (Metamorphism and tectonics). Textbook. Moscow: Intermet-Inzhiniring, 2001, 216 p.
- Shikina N. D., Tagirov B. R., Volchenkova V. A., Bychkova Ya. V. *Zr/Hf otnoshenie v sverkhkriticheskikh khlordnykh flyuidakh: eksperimental'noe izuchenie kompleksobrazovaniya tsirkoniya i gafniya pri 450 °C, 0.6–1 kbar* (Zr/Hf ratio in supercritical chloride fluids: an experimental study of the complexation of zirconium and hafnium at 450 °C, 0.6–1 KBar). *Petrology*, 2015, V. 23, No. 1, pp. 101–110.
- Yuretskiy V. N., Petrov V. I., Kuznetsov G. P., Levin V. Ya., Punegov B. N. i dr. *Otchet il'menogorskogo geologos'emchnogo otryada o rezul'tatakh geologicheskogo doizucheniya masshtaba 1:50000 Il'menogorskoj ploschadi* (Report of ilmenogorsky geological survey group on the results of geological additional study of the scale of 1:50000 Ilmenogorsk area.). PGO «Uralgeologiya», CHGRE, 1982.
- Allen J. L., Shaw C. A. Seismogenic structure of a crystalline thrust fault: Fabric anisotropy and coeval pseudotachylite–mylonitic pseudotachylite in the Grizzly Creek shear zone, Colorado. *Geological Society, London, Special Publications*, 2011, V. 359, No. 1, pp. 135–151.
- Hetzel R., Glodny J. A crustal-scale, orogen-parallel strike-slip fault in the Middle Urals: age, magnitude of displacement, and geodynamic significance. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, V. 91, No. 2, pp. 231–254.
- O'Hara K., Blackburn W. H. Volume-loss model for trace-element enrichments in mylonites. *Geology*. 1989, V. 17, No. 6, pp. 524–527.
- Spray J. G. *Geology*, 1995, V. 23, No. 12, pp. 1119–1122.
- Trouw R. A. J., Passchier C. W., Wiersma D. J. *Atlas mylonites and related microstructures*. Springer, 2010, 322 pp.