

УДК 550.425+550.93 (470.5)

# ПЕТРОЛОГИЯ, U-Pb ИЗОТОПНЫЙ ВОЗРАСТ И МЕТАМОРФИЗМ НЯШЕВСКОГО ПОЛИГЕНННОГО МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2017 г. П. М. Вализер<sup>1</sup>, А. А. Краснобаев<sup>2</sup>, А. И. Русин<sup>2</sup>, Н. М. Мурдасова<sup>1</sup><sup>1</sup>Ильменский государственный заповедник, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник,  
e-mails: Valizer@ilmeny.ac.ru; winned\_by\_dream@inbox.ru<sup>2</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,  
e-mails: krasnobaev@igg.uran.ru; rusin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 22.02.2017 г.; принята к печати 20.04.2017 г.

В статье приводятся результаты минералого-петрографического, геохимического и изотопно-геохронологического исследования Няшевского мафит-ультрамафитового массива Ильмено-Вишневогорской зоны. Ультрамафиты сложены серпентином и хлоритом (до 90 %), второстепенными и редкими минералами – тальком, карбонатом, тремолитом, хроммагнетитом-магнетитом, амфиболом, гранатом, биотитом, мусковитом, кyanитом, скаполитом, калиевым полевым шпатом, цирконом и кварцем. Микрозондовый анализ состава минералов выполнен на растровом микроскопе РЭММА-202М с микроанализатором. Содержания петрогенных, редких и редкоземельных элементов определены атомно-абсорбционным методом и на масс-спектрометре ICP-MS. **U-Pb возраст цирконов** получен на микрозонде SHRIMP II. Ультрамафиты Няшевского массива имеют вариации содержания кремнезема от 38 до 42 мас. % и #Mg от 0.89 до 0.92, незначительные концентрации алюминия – от 0.6 до 2.0 и кальция – от 0.3 до 2.8 мас. %. Характеризуются высокими содержаниями хрома (550–2400 г/т) и никеля (800–2000 г/т), низкими – титана (до 75), редких (6.0–117.4) и редкоземельных элементов ( $\Sigma = 1.3–4.3$  г/т). Отмечается сравнительно высокое содержание в них Rb = 0.10–0.57, Sr = 3–42, Ba = 3–95 г/т, **Ba/Sr = 0.4–7.7**. Датировка цирконов  $1892 \pm 23$  млн лет из ультрамафитов массива относится к минимальному возрасту их мантийного субстрата, представляющего, вероятно, его реститовый остаток. Присутствие в ультрамафитах пироп-альмандинового ( $Py_{18-26}Grs_{3-4}$ ) и альмандин-гроссулярового ( $Py_{6-8}Grs_{54-57}$ ) гранатов, высокоглиноземистых и магнезиальных алюмоэнстатита (#Mg = 0.77) и шпинели (#Mg = 0.72–0.75) свидетельствует, что их образование–преобразование происходило при  $T = 900–1050^\circ\text{C}$  и  $P \geq 9$  кбар. Становление Няшевского массива определяется верхнеордовикским ( $443 \pm 12$  млн лет) рубежом и практически совпадает с максимальными цифрами возраста ультрамафитов Булдымского щелочно-карбонатитового массива. Пермская ( $275.8 \pm 2.1$  млн лет) датировка отражает процессы серпентинизации и скаполитизации в ультрамафитах и коррелируется с возрастными параметрами цирконов из поздних мискинов, карбонатитов и пегматитов. Няшевский массив был образован в глубинной зоне протерозойского континентального рифта, испытал многоэтапные метаморфические преобразования при декомпрессионном подъеме в нижнюю кору и последующую дезинтеграцию в постколлизийном региональном сдвиге.

**Ключевые слова:** ильмено-вишневогорский комплекс, Няшевский массив, изотопный возраст, метаморфизм, геохимия

## PETROLOGY, U-Pb ISOTOPE AGE AND METAMORPHISM OF NYASHEVO POLYGENIC MAFIT-ULTRAMAFITE MASSIVE (THE SOUTHERN URALS)

Petr M. Valizer<sup>1</sup>, Artur A. Krasnobaev<sup>2</sup>, Anatolii I. Rusin<sup>2</sup>, Natal'ya M. Murdasova<sup>1</sup><sup>1</sup>Ilmen State Reserve, Ilmensky Reserve, Miass, 456317, Russia, e-mails: Valizer@ilmeny.ac.ru; winned\_by\_dream@inbox.ru<sup>2</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Acad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016, Russia,  
e-mails: krasnobaev@igg.uran.ru; rusin@igg.uran.ru

Received 22.02.2017; accepted 20.04.2017

In the article is presented data of mineralogy, petrography, geochemistry and isotope-geochronology study Nyashevo mafic-ultramafic massif in Ilmeny-Vishnevogorsk polymetamorphic shear zone. The ultramafic rocks consist of serpentine and chlorite (up to 90 %), accessory and rare minerals – talc, carbonate, tremolite, chromium-magnetite, amphibole, garnet, biotite, muscovite, kyanite, scapolite, potassium-feldspar, zircon and quartz. The microprobe analysis of the composition

**Для цитирования:** Вализер П.М., Краснобаев А.А., Русин А.И., Мурдасова Н.М. (2017) Петрология, U-Pb изотопный возраст и метаморфизм Няшевского полигенного мафит-ультрамафитового массива (Южный Урал). *Литосфера*, 17(5), 85–102. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-17-5-085-102

**For citation:** Valizer P.M., Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Murdasova N.M. (2017) Petrology, U-Pb isotope age and metamorphism of Nyashevo polygenic mafit-ultramafite massive (South Ural). *Litosfera*, 17(5), 85–102. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-17-5-085-102

of minerals was performed with a REMMA-202M scanning microscope with a microanalyzer. The contents of petrogenic, rare and rare-earth elements are determined by the atomic absorption method and by the ICP-MS mass spectrometer. U-Pb age in zircon was obtained on microprobe SHRIMP II. The Nyashevo ultramafic rocks have variations of the content of  $\text{SiO}_2$  from 38 to 42 wt % and of #Mg from 0.89 to 0.92, minor concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  from 0.6 to 2.0 wt % and CaO from 0.3 to 2.8 wt %, increase contents Cr (550–2400) and Ni (800–2000 ppm), low – Ti (to 75), HSE (6.0–117.4) и REE ( $\Sigma = 1.3\text{--}4.3\text{ppm}$ ). Relatively high content Rb = 0.10–0.57, Sr = 3–42, Ba = 3–95 ppm and relation Ba/Sr = 0.4–7.7. The  $1892 \pm 23$  Ma of zircons dating from ultramafic rocks of massif are the minimum age of the mantle substrate, probably is his restite. The appearance of pyrope-almandine ( $\text{Py}_{18-26}\text{Grs}_{3-4}$ ) and almandine-grossular ( $\text{Py}_{6-8}\text{Grs}_{54-57}$ ) garnets, high-aluminous and magnesian aluminosilicates (#Mg = 0.77) and spinel (#Mg = 0.72–0.75) in ultramafic rocks suggests formation-transformation occurred at  $T = 900\text{--}1050^\circ\text{C}$  и  $P \geq 9$  kbar. The formations of Nyashevo massif is the age of the Late Ordovician ( $443 \pm 12$  Ma) and almost coincides with the maximum marks of age Buldym ultramafic alkaline-carbonatite massif. The Permian ( $275.8 \pm 2.1$  Ma) dating reflects the processes of serpentinization and scapolitization in ultramafic rocks and it correlated with the age parameters of zircons from late miaskites, carbonatites and pegmatites. Nyashevo mafic-ultramafic massif was formed in the deep zone of the Proterozoic continental rift, it undergone a multistage metamorphic transformation during decompression ascent in the lower crust and subsequent disintegration in regional post-collision shear zone.

**Keywords:** Ilmeny-Vishnevogorsk polymetamorphic complex, Nyashevo massif, U-Pb dating, metamorphism, geochemistry

## ВВЕДЕНИЕ

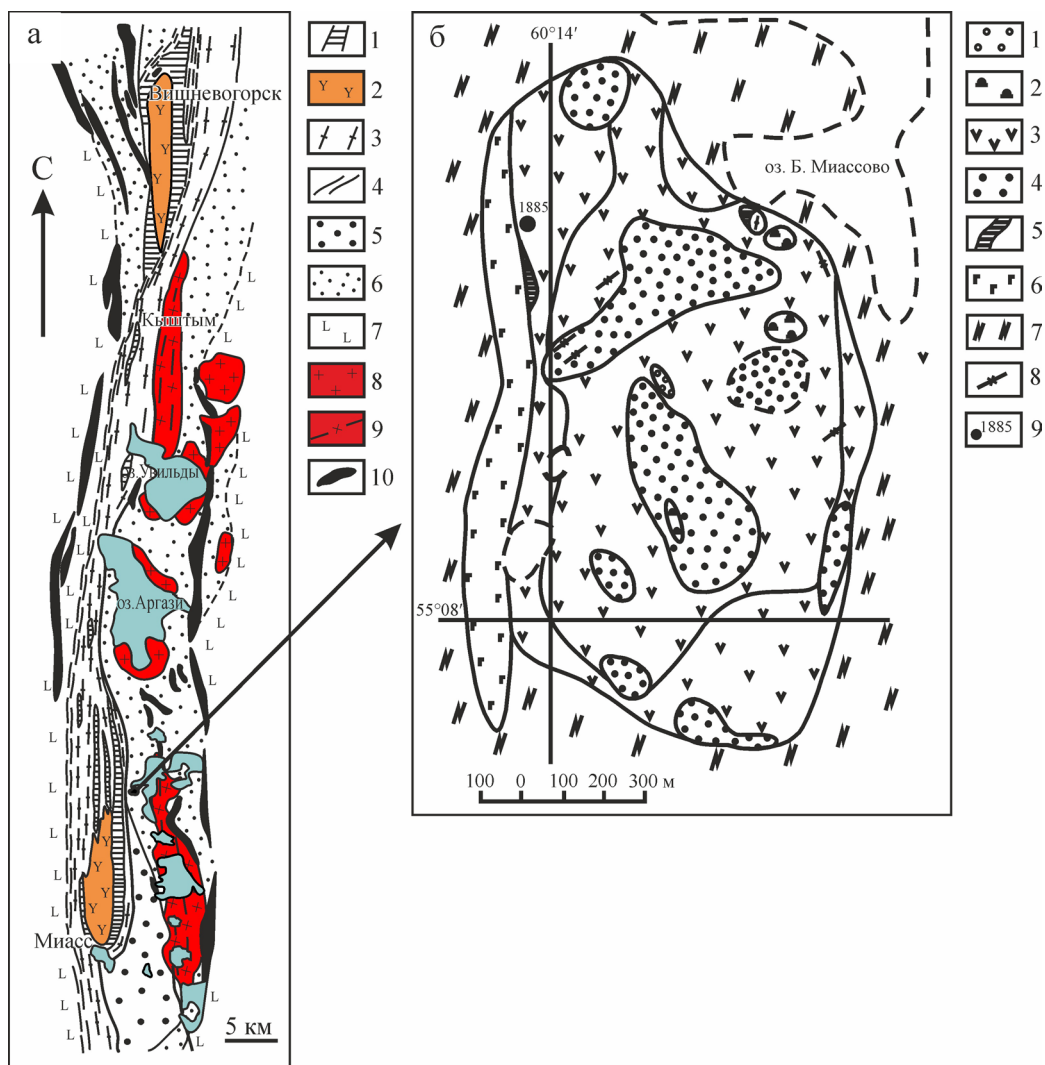
Ильменогорский комплекс метаморфических и плутонических пород является глубинным фрагментом регионального сдвига, сформированного постколлизийными событиями, проявившимися на Урале в конце палеозоя–начале мезозоя [Банева, Русин, 2014]. Ультрамафиты развиты в осевой части комплекса и его восточном и западном обрамлениях. Они слагают относительно крупные серпентинитовые массивы (Няшевский, Уразбаевский, Булдымский и др.), обладающие индивидуальными особенностями строения и минерального состава, а также представлены многочисленными мелкими будинообразными и линзовидными телами тальк-антофиллитовых, тальк-карбонатных, тремолит-антофиллитовых и других пород, практически не содержащих реликтовых минералов. В процессе исследований высказывались разные представления об их формационной принадлежности и времени образования. Допускалась возможность отнесения ультрамафитов к дунит-гарцбургитовой части разреза раннегеосинклинальной офиолитовой ассоциации [Штейнберг, Левин, 1971], к стратифицированным аповулканическим образованиям архей-протерозойского возраста и метасоматической по природе ранней оливин-энстатитовой минеральной ассоциации [Левин, 1974; и др.] либо к рифейским “рифтогенным офиолитам” [Варлаков и др., 1998], возникшим в результате метаморфического и метасоматического преобразования вулканогенно-осадочных толщ.

Критическое рассмотрение представлений разных авторов и анализ всей совокупности имеющихся фактических данных, включающих результаты геологического картирования и значительные объемы новых аналитических материалов, позволили выдвинуть принципиально новую идею о принадлежности ультрамафитов и ассоциирующих с ними пород к многофазной щелочно-ультраосновной ин-

трузии центрального типа, выведенной в структуру нижней коры в связи с процессами континентального рифтогенеза и дезинтегрированной на многочисленные фрагменты при формировании постколлизийного сдвига [Русин и др., 2006а, 2006б, 2012]. В каких объемных соотношениях находились в этой интрузии главные породные ассоциации, фрагментарно сохранившиеся в крупных массивах ультрамафитов, сказать сложно. Однако все они достаточно уверенно диагностируются и позволяют утверждать, что щелочно-ультрамафитовая ассоциация Ильмено-Вишневогорской зоны возникла не в результате трансформации гнейсово-амфиболитового корового субстрата [Левин и др., 1997], а является производной глубинного мантийного магматизма.

## КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА

Няшевский массив (НМ) лизардит-серпофитовых серпентинитов, расположенный в центральной части Ильмено-Вишневогорской сдвиговой зоны, западнее оз. Б. Миассово, образует субмеридианальное вытянутое тело размером  $1.6 \times 0.8$  км [Варлаков, 1995]. На западе к массиву прилегает полоса анортитовых амфиболитов (“метафидолитов”), имеющая с ним тектонический контакт (рис. 1). Внутреннее строение массива осложнено тектоническими нарушениями и присутствием включений субщелочных метасоматитов основного и среднего состава, а также жилообразных тел гранитоидных пород письменной структуры [Варлаков, 1995; Медведева и др., 2015]. Основным типом пород НМ являются серпентиниты, содержащие редкие реликтовые зерна оливина, энстатита и тремолита, указывающие на то, что исходные породы могли иметь энстатит-оливиновый или тремолит-энстатит-оливиновый состав при преобладании оливина. Ультрамафиты и метам-



**Рис. 1.** Геологическая схема Ильменогорского комплекса (а) и Няшевского массива (б) [Варлаков 1995; Варлаков и др., 1998].

а. 1 – селяннинская серия амфиболит-гнейсово-плагиомигматитовая (Ar-Pt<sub>1</sub>); 2 – массивы миаскитов (O<sub>2</sub>); 3 – милониты гранитоидного и сиенитового состава (P<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>(?)); 4 – милониты Кыштымского сдвига-надвига; 5 – еланчиковская толща: тектониты гранитоидного состава; 6 – сайтовская серия, метатерригенная; 7 – зеленосланцевые осадочно-вулканогенные комплексы Западно-Магнитогорской и Арамилско-Сухтелинской зон; 8 – Увильдинский монзонит-гранитный комплекс (Pz<sub>3</sub>); 9 – гнейсовидные граниты Кисегачского комплекса, 10 – метагипербазиты.

б. 1 – лерцолит измененный, 2 – оливин-энстатитовая порода аповерлитовая, 3 – серпентинит по энстатит-оливиновой породе, 4 – серпентинит аподунитовый, 5 – клинопироксениты и вебстериты, 6 – габброиды, 7 – амфиболиты, 8 – пегматиты и сиениты, 9 – место отбора пробы.

**Fig. 1.** Schematic geological maps of the Ilmenogorsky polymetamorphic complex (a), the Nyashevo mafic-ultramafic massif (b) [Varlakov 1995; Varlakov et al., 1998].

а. 1 – Selyankino Group, Archean to Early Proterozoic amphibolite-gneiss-plagiomigmatite rocks; 2 – Middle Ordovician miaskite massifs; 3 – Middle Permian – Lower Triassic (?) granitic and syenitic blastomylonites; 4 – mylonites of the Kyshtym strike-slip fault thrust; 5 – Elanchik strata: plagioshales and injection of migmatites; 6 – Saitovo sequence, metaterigenous rocks; 7 – green-schist volcanosedimentary complexes of the West Magnitogorsk and Aramil-Sukhteli zones; 8 – Upper Precambrian Uvil'dy monzogranitic complex; 9 – gneissic granites of the Kisegach complex; 10 – metaultramafic rocks.

б. 1 – metalherzolite, 2 – metaverlite-olivine-enstatite rocks, 3 – serpentinites after enstatite-olivine rocks, 4 – metadunite serpentinites, 5 – clinopyroxenites and websterites, 6 – gabbroidic rocks, 7 – amphibolites, 8 – pegmatites and syenites, 9 – sampling place.

фиты после включения в структуру коры испыта-  
 ли интенсивный амфиболитовый диафорез и бо-  
 лее поздние метасоматические преобразования в  
 условиях зеленосланцевой фации, что привело к

развитию широкого спектра вторичных минералов:  
 D- и Y-лизардитов, повелен-хризотила, хризотила,  
 хроммагнетит-магнетита, зеленой шпинели (позд-  
 ней), клинохлора, талька, карбоната и др.

Ограниченность объективной информации об исходном минеральном составе пород и последовательности метаморфических и метасоматических преобразований вызывает появление различных гипотетических рассуждений о природе НМ, часто взаимоисключающих [Левин и др., 1997; Варлаков и др., 1998]. Совершенно очевидно, что палеореконструкции истории образования и преобразования мантийных мафит-ультрамафитовых блоков в постколлизийной сдвиговой зоне не могут основываться на построениях, используемых при создании характеристик типовых метаморфических комплексов [Варлаков и др., 1998], и требуют привлечения нетрадиционных методических подходов. Унифицированная модель структурно-вещественной эволюции и изотопного возраста Ильмено-Вишневогорской зоны, учитывающая новую трактовку ее природы, дана в работе Н.Н. Баневой и А.И. Русина [2014]. Полученные в последнее время новые результаты петролого-минералогического, геохимического и изотопно-геохронологического исследования Няшевского массива, несмотря на некоторую специфику его строения, позволяют говорить о формационном единстве с другими мафит-ультрамафитовыми фрагментами исходной щелочно-ультраосновной интрузии.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналитические исследования вещества выполнены на базе ЦКП «ЧОУЦКП по исследованию минерального сырья» (ИМин-ИГЗ): микрозондовый анализ состава минералов осуществляли на растровом микроскопе РЭММА-202М с микроанализатором (аналитик В.А. Котляров). Ускоряющее напряжение 20 КВт, ток на образце  $H \times 10^{-10}$  А. Стандарты: **AstJMEХ scientific Limited MJNM 25–53 Mineral Mount serial № 01–044. Содержание петрогенных, редких и редкоземельных элементов определяли атомно-абсорбционным методом (аналитик Н.В. Шаршуева) и на масс-спектрометре ICP-MS (аналитики К.А. Филиппова, М.С. Свиренко). U-Pb возраст цирконов установлен на микрозонде SHRIMP II в ЦНИИ ВСЕГЕИ по известной методике [Williams, 1998].**

## ПЕТРОГРАФИЯ

Ультрамафиты массива представлены серпентинитами зеленовато-серого, черного цветов, сланцеватой, реже массивной текстуры. По степени интенсивности серпентинизации и хлоритизации их можно подразделить на три разновидности: 1 – ультрамафиты с реликтами оливина и ортопироксена, 2 – магнетит-серпентиновые ультрамафиты, 3 – магнетит-хлоритовые ультрамафиты.

Серпентиниты с реликтами оливина и ортопироксена (1) сложены оливином (до 7%), ортопи-

роксеном (до 10), роговой обманкой и тремолитом (до 5), серпентином (70–85), магнетитом (8–10), хлоритом и карбонатом (до 5%). Оливин и энстатит представлены округлыми или короткопризматическими кристаллами неправильной формы в серпентинитовой матриксе (рис. 2а). Тремолит образует удлиненные прозрачные кристаллы, разбитые по трещинам отдельности и заполненные лизардитом (рис. 2б). Серпентин соответствует лизардиту и хризотилу, в малом количестве – антигориту, который развит по энстатиту (рис. 2в). Магнетит развит в виде крупных (1.00–15.00 мм) зерен и тонкой (до 0.01 мм) присыпки. Карбонат слагает прожилки и округлые агрегаты.

Магнетит-серпентиновые ультрамафиты (2) сложены в основном ленточно-петельчатым лизардитом и хризотилом при незначительном количестве волокон и чешуек антигорита. Магнетит образует угловатые трещиноватые зерна. Развиты прожилки и округлые выделения карбоната, хлорита и кварца.

Магнетит-хлоритовые ультрамафиты (3) представлены веерообразным хлоритом с ксеноморфными зернами магнетита. В значительном количестве присутствуют карбонат и тальк с кварцем в виде скоплений и прожилков (рис. 2г).

Среди серпентинитов Няшевского массива присутствуют в подчиненном количестве субщелочные метасоматиты основного и среднего состава, а также мелкие тела гранитных пегматитов, петрографическая характеристика которых содержится в работах А.С. Варлакова и Е.В. Медведевой [Варлаков, 1995; Медведева и др., 2015].

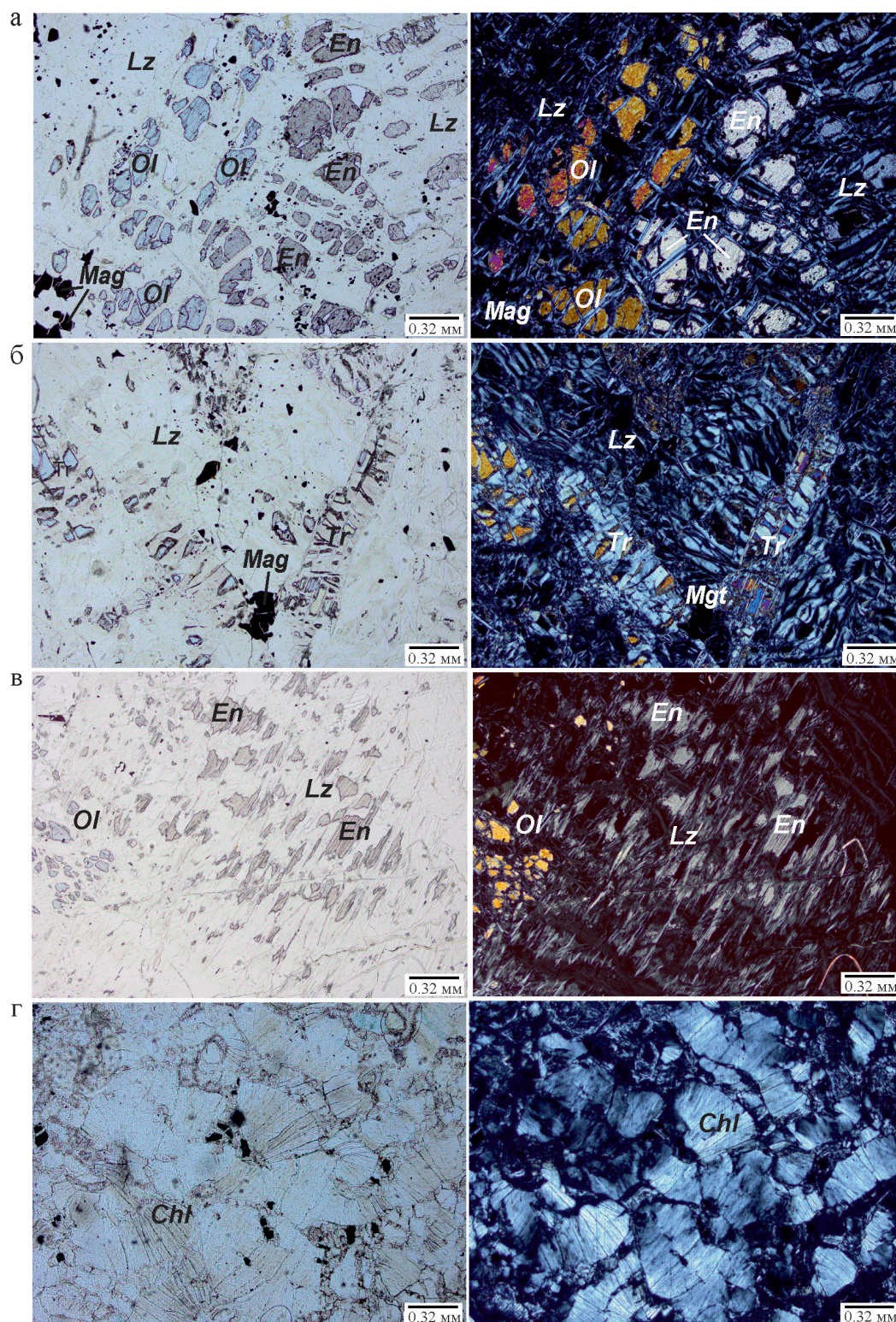
## МИНЕРАЛЫ

Серпентиниты Няшевского массива сложены оливином, энстатитом и шпинелью, которые представляют до 2–5% объема породы и могут рассматриваться как реликтовые минералы (табл. 1). Основная ткань (до 90%) сложена серпентином и хлоритом, второстепенными минералами – тальком, карбонатом, тремолитом, хроммагнетитом, магнетитом, редкими минералами – амфиболом, гранатом, биотитом, мусковитом, кианитом, скаполитом, калиевым полевым шпатом, цирконом и кварцем.

Оливин соответствует магнезиальному форстериту ( $\#Mg = 0.96$ ). Зерна округлой формы размером до 0.2 мм имеют каймы сложенные доломитом ( $Mg_{0.44}Ca_{0.56}$ ), лизардитом ( $\#Mg = 0.95$ ) и тальком ( $\#Mg = 0.96$ ) или почти полностью замещены ими, редко встречается как включения в хроммагнетите (рис. 3а, б).

Энстатит ( $\#Mg = 0.96–0.97$ ) сохранился в виде мелких ( $<0.1$  мм) зерен с округлыми либо неправильными извилистыми контурами в лизардитовой матриксе и определен как включение в пироп-





**Рис. 2.** Петрографические разности ультрамафитов Няшевского массива.

а – серпентинит с реликтами *Ol* и *En*; б – замещение *Tr-Lz + Mag*; в – серпентинит с реликтами *En*; г – магнетит-хлоритовая порода.

**Fig. 2.** The species of ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

а – serpentinite with including of relict *Ol* and *En*; б – replacement *Tr-Lz + Mag*; в – serpentinite with including of relict *En*; г – magnetite-chlorite rock.



**Таблица 1.** Химический состав и кристаллохимические формулы минералов ультрамафитов Няшевского массива (мас. %)**Table 1.** Chemical composition and structural formulae of the minerals from ultramafic rocks of the Nyashevo massif (wt. %)

| Компонент                                | <i>Ol</i> |           | <i>En</i>  |       | <i>Spl</i> |       | <i>Grt</i> |       |       | <i>En</i> | <i>Bi</i> | <i>Ms</i> | <i>Ky</i> |
|------------------------------------------|-----------|-----------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>                         | 41.8      | 41.5      | 57.4       | 58.4  | —          | —     | 37.9       | 38.2  | 37.2  | 55.4      | 36.8      | 48.0      | 35.6      |
| TiO <sub>2</sub>                         | —         | —         | 0.00       | 0.01  | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00      | 3.54      | 0.13      | 0.00      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | —         | —         | 1.22       | 0.00  | 62.9       | 64.2  | 21.1       | 21.5  | 20.3  | 2.90      | 18.6      | 33.7      | 63.2      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | —         | —         | 0.00       | 0.00  | 4.35       | 4.63  | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00      | 0.00      | 0.00      | —         |
| FeO                                      | 3.9       | 4.02      | 3.06       | 2.19  | 13.2       | 11.1  | 28.2       | 27.9  | 28.1  | 12.8      | 13.7      | 2.83      | 0.52      |
| MnO                                      | 0.37      | 0.26      | 0.11       | 0.02  | 0.11       | 0.00  | 4.98       | 4.43  | 4.28  | 0.60      | 0.00      | 0.00      | —         |
| MgO                                      | 53.5      | 53.3      | 37.9       | 39.0  | 18.8       | 19.4  | 6.41       | 6.52  | 1.28  | 26.4      | 14.5      | 1.31      | —         |
| CaO                                      | —         | —         | 0.16       | 0.13  | —          | —     | 1.06       | 1.45  | 8.64  | 1.15      | 0.17      | 1.37      | —         |
| Na <sub>2</sub> O                        | —         | —         | 0.10       | 0.00  | —          | —     | —          | —     | —     | —         | 0.00      | 0.00      | —         |
| K <sub>2</sub> O                         | —         | —         | —          | —     | —          | —     | —          | —     | —     | —         | 9.35      | 8.83      | —         |
| NiO                                      | 0.39      | 0.35      | —          | —     | 0.33       | 0.34  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| Σ                                        | 99.96     | 99.43     | 99.95      | 99.75 | 99.69      | 99.67 | 99.65      | 100.0 | 99.80 | 99.25     | 96.66     | 96.17     | 99.32     |
| Коэффициенты кристаллохимической формулы |           |           |            |       |            |       |            |       |       |           |           |           |           |
| Si                                       | 1.00      | 1.00      | 1.94       | 1.97  | —          | —     | 3.00       | 3.00  | 3.00  | 2.02      | 2.73      | 3.13      | 0.97      |
| Ti                                       | —         | —         | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00      | 0.20      | 0.01      | —         |
| Al                                       | —         | —         | 0.05       | 0.00  | 1.91       | 1.92  | 1.96       | 1.99  | 1.93  | 0.13      | 1.63      | 2.58      | 2.02      |
| Gr                                       | —         | —         | 0.00       | 0.00  | 0.09       | 0.09  | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00      | 0.00      | 0.00      | —         |
| Fe                                       | 0.08      | 0.08      | 0.09       | 0.06  | 0.28       | 0.24  | 1.86       | 1.83  | 1.89  | 0.39      | 0.85      | 0.15      | 0.01      |
| Mn                                       | 0.01      | 0.01      | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.33       | 0.30  | 0.29  | 0.02      | 0.00      | 0.00      | —         |
| Mg                                       | 1.91      | 1.91      | 1.91       | 1.96  | 0.72       | 0.75  | 0.76       | 0.76  | 0.15  | 1.40      | 1.59      | 0.13      | —         |
| Ca                                       | —         | —         | 0.01       | 0.01  | —          | —     | 0.09       | 0.12  | 0.74  | 0.04      | 0.01      | 0.10      | —         |
| Na                                       | —         | —         | 0.00       | 0.00  | —          | —     | —          | —     | —     | —         | 0.00      | 0.00      | —         |
| K                                        | —         | —         | —          | —     | —          | —     | —          | —     | —     | —         | 0.89      | 0.74      | —         |
| #Mg                                      | 0.96      | 0.96      | 0.96       | 0.97  | 0.72       | 0.75  | 0.26       | 0.26  | 0.07  | 0.77      | 0.65      | 0.45      | —         |
| #Ca                                      | —         | —         | —          | —     | —          | —     | 0.03       | 0.04  | 0.25  | —         | —         | —         | —         |
| Коэффициенты кристаллохимической формулы |           |           |            |       |            |       |            |       |       |           |           |           |           |
|                                          | <i>Ts</i> | <i>Ed</i> | <i>Hbl</i> |       |            |       | <i>Srp</i> |       |       |           |           |           |           |
| SiO <sub>2</sub>                         | 46.0      | 45.9      | 49.9       | 51.2  | 54.3       | 54.6  | 39.0       | 42.0  | 42.9  | 45.5      | 39.5      | 45.1      | 38.6      |
| TiO <sub>2</sub>                         | 0.25      | 0.29      | 0.03       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 12.0      | 12.1      | 9.55       | 6.80  | 4.87       | 3.88  | 0.04       | 0.00  | 0.00  | 1.04      | 1.68      | 3.55      | 4.96      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 0.00      | 0.00      | 0.15       | 0.20  | 0.28       | 0.00  | 0.00       | 0.07  | 0.45  | 0.00      | 0.05      | 0.19      | 0.35      |
| FeO                                      | 9.14      | 8.76      | 5.08       | 3.63  | 3.08       | 2.38  | 11.7       | 4.13  | 1.54  | 4.54      | 8.95      | 1.13      | 11.1      |
| MnO                                      | 0.07      | 0.07      | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.02  | 0.01       | 0.00  | 0.00  | 0.00      | 0.26      | 0.00      | 0.06      |
| MgO                                      | 16.2      | 15.9      | 19.6       | 21.4  | 22.4       | 23.5  | 37.1       | 41.2  | 42.0  | 35.2      | 37.6      | 36.2      | 32.3      |
| CaO                                      | 12.3      | 12.4      | 13.1       | 12.6  | 12.8       | 12.8  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| Na <sub>2</sub> O                        | 1.53      | 2.5       | 0.85       | 1.37  | 0.35       | 0.19  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| K <sub>2</sub> O                         | 0.31      | 0.21      | 0.29       | 0.26  | 0.39       | 0.19  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| NiO                                      | —         | —         | —          | —     | —          | —     | 0.47       | 0.00  | 0.13  | 0.04      | 0.00      | 0.00      | 0.00      |
| Σ                                        | 97.80     | 98.13     | 98.55      | 97.46 | 98.47      | 97.56 | 88.32      | 87.40 | 86.89 | 86.32     | 88.04     | 86.17     | 87.37     |
| Коэффициенты кристаллохимической формулы |           |           |            |       |            |       |            |       |       |           |           |           |           |
| Si                                       | 6.49      | 6.52      | 6.85       | 7.05  | 7.34       | 7.38  | 3.75       | 3.93  | 4.00  | 4.44      | 3.79      | 4.42      | 3.89      |
| Ti                                       | 0.03      | 0.03      | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| Al                                       | 1.99      | 2.03      | 1.54       | 1.10  | 0.78       | 0.62  | 0.00       | 0.00  | 0.02  | 0.06      | 0.10      | 0.20      | 0.29      |
| Gr                                       | 0.00      | 0.00      | 0.02       | 0.03  | 0.03       | —     | 0.00       | 0.01  | 0.00  | 0.00      | 0.00      | 0.01      | 0.01      |
| Fe                                       | 1.08      | 1.04      | 0.58       | 0.42  | 0.35       | 0.27  | 0.94       | 0.32  | 0.12  | 0.37      | 0.72      | 0.09      | 0.94      |
| Mn                                       | 0.00      | 0.01      | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00  | 0.00      | 0.02      | 0.00      | 0.01      |
| Mg                                       | 3.41      | 3.37      | 4.01       | 4.40  | 4.50       | 4.73  | 5.13       | 5.74  | 5.86  | 5.31      | 5.37      | 5.28      | 4.86      |
| Ca                                       | 1.86      | 1.88      | 1.93       | 1.87  | 1.86       | 1.85  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| Na                                       | 0.42      | 0.69      | 0.23       | 0.36  | 0.09       | 0.05  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| K                                        | 0.06      | 0.04      | 0.05       | 0.05  | 0.07       | 0.03  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |
| #Mg                                      | 0.76      | 0.76      | 0.87       | 0.89  | 0.93       | 0.95  | 0.85       | 0.93  | 0.98  | 0.93      | 0.88      | 0.98      | 0.82      |
| #Ca                                      | 0.80      | 0.72      | 0.87       | 0.82  | 0.92       | 0.96  | —          | —     | —     | —         | —         | —         | —         |

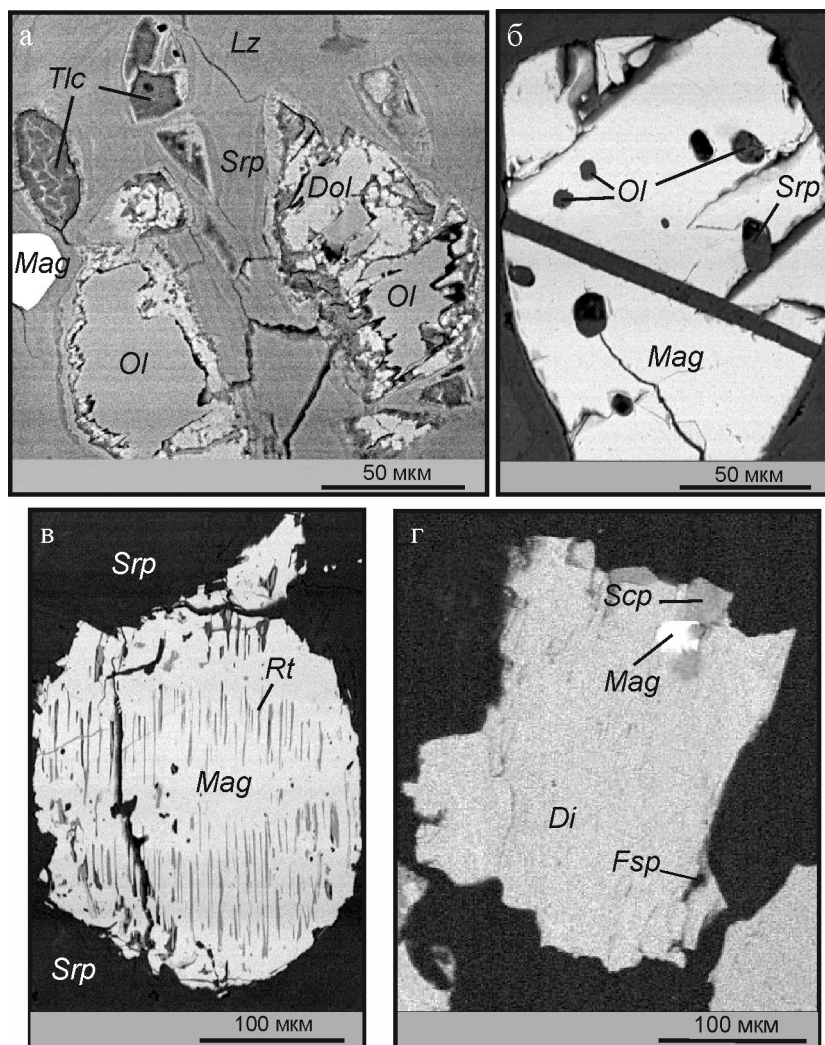
Табл. 1. Окончание

Table 1. Ending

| Компонент                                | <i>Tr</i>  |       | <i>Chl</i> |       |            |       |           | <i>Dol-Cal</i> |       |            | <i>Tlc</i> |            |
|------------------------------------------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|-----------|----------------|-------|------------|------------|------------|
| SiO <sub>2</sub>                         | 56.5       | 57.8  | 29.5       | 31.8  | 33.0       | 34.7  | 37.4      | —              | —     | —          | 64.3       | 63.4       |
| TiO <sub>2</sub>                         | 0.00       | 0.08  | 0.00       | 0.00  | 0.00       | 0.00  | 0.00      | —              | —     | —          | —          | —          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 2.44       | 1.45  | 18.4       | 17.0  | 14.6       | 9.15  | 6.02      | —              | —     | —          | 0.54       | 0.00       |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 0.13       | 0.00  | 2.14       | 0.02  | 0.34       | 0.64  | 0.37      | —              | —     | —          | —          | —          |
| FeO                                      | 2.23       | 1.54  | 2.57       | 2.28  | 1.92       | 10.63 | 4.74      | 0.58           | 0.30  | 0.14       | 0.92       | 2.13       |
| MnO                                      | 0.00       | 0.00  | 0.17       | 0.00  | 0.09       | —     | 0.23      | 1.23           | 0.00  | 0.28       | —          | —          |
| MgO                                      | 23.5       | 24.0  | 34.6       | 36.3  | 37.4       | 32.6  | 38.8      | 21.0           | 8.31  | 0.36       | 31.2       | 32.1       |
| CaO                                      | 13.2       | 13.0  | —          | —     | —          | —     | —         | 29.9           | 46.0  | 55.3       | —          | —          |
| Na <sub>2</sub> O                        | 0.05       | 0.16  | —          | —     | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
| K <sub>2</sub> O                         | 0.15       | 0.00  | —          | —     | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
| NiO                                      | —          | —     | 0.25       | 0.07  | 0.00       | 0.1   | 0.03      | —              | —     | —          | 0.23       | 0.00       |
| Σ                                        | 98.20      | 98.03 | 87.63      | 87.47 | 87.35      | 87.82 | 87.59     | 52.71          | 54.61 | 56.08      | 97.19      | 97.63      |
| Коэффициенты кристаллохимической формулы |            |       |            |       |            |       |           |                |       |            |            |            |
| Si                                       | 7.63       | 7.77  | 2.77       | 2.95  | 3.06       | 3.36  | 3.50      | —              | —     | —          | 4.00       | 3.93       |
| Ti                                       | —          | 0.01  | —          | —     | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
| Al                                       | 0.39       | 0.23  | 2.03       | 1.86  | 1.59       | 1.04  | 0.66      | —              | —     | —          | 0.04       | 0.00       |
| Gr                                       | 0.01       | 0.00  | 0.16       | 0.00  | 0.02       | 0.05  | 0.03      | —              | —     | —          | —          | —          |
| Fe                                       | 0.25       | 0.17  | 0.20       | 0.18  | 0.15       | 0.86  | 0.37      | 0.01           | 0.00  | 0.00       | 0.05       | 0.11       |
| Mn                                       | 0.00       | 0.00  | 0.01       | 0.00  | 0.01       | 0.00  | 0.02      | 0.02           | 0.00  | 0.01       | —          | —          |
| Mg                                       | 4.72       | 4.82  | 4.83       | 5.01  | 5.17       | 4.69  | 5.42      | 0.48           | 0.20  | 0.01       | 2.91       | 2.96       |
| Ca                                       | 1.91       | 1.87  | —          | —     | —          | —     | —         | 0.49           | 0.80  | 0.98       | —          | —          |
| Na                                       | 0.01       | 0.04  | —          | —     | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
| K                                        | 0.03       | 0.00  | —          | —     | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
| #Mg                                      | 0.95       | 0.97  | 0.96       | 0.96  | 0.97       | 0.84  | 0.93      | —              | —     | —          | 0.98       | 0.96       |
| #Ca                                      | 0.98       | 0.98  | —          | —     | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
|                                          | <i>Cum</i> |       | <i>Mag</i> |       | <i>Grt</i> |       | <i>Di</i> |                |       | <i>Scp</i> | <i>Fsp</i> | <i>Ttn</i> |
| SiO <sub>2</sub>                         | 56.1       | —     | —          | —     | 38.5       | 38.4  | 53.5      | 52.8           | 52.7  | 50.5       | 64.5       | 29.9       |
| TiO <sub>2</sub>                         | 0.00       | 0.25  | 0.00       | 0.00  | 0.10       | 0.00  | 0.00      | 0.00           | 0.00  | 0.00       | 0.00       | 36.4       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 2.37       | 0.8   | 1.87       | 0.74  | 20.6       | 20.7  | 0.65      | 0.61           | 0.34  | 23.9       | 18.5       | 3.73       |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 0.00       | 3.26  | 11.1       | 17.4  | 0.00       | 0.00  | 0.00      | 0.00           | 0.00  | —          | —          | —          |
| FeO                                      | 14.0       | 95.6  | 70.8       | 72.5  | 18.3       | 17.6  | 9.46      | 7.75           | 8.51  | 0.38       | 0.00       | 0.92       |
| MnO                                      | 0.27       | 0.00  | 0.22       | 0.10  | 0.61       | 1.12  | 0.17      | 0.10           | 0.16  | 0.00       | 0.00       | 0.00       |
| MgO                                      | 24.6       | 0.00  | 6.34       | 0.00  | 2.10       | 1.54  | 12.5      | 13.4           | 12.7  | 0.00       | 0.00       | 0.00       |
| CaO                                      | 0.56       | —     | —          | —     | 19.4       | 20.3  | 22.8      | 25.1           | 25.1  | 13.0       | 0.00       | 28.7       |
| Na <sub>2</sub> O                        | 0.00       | —     | —          | —     | —          | —     | 0.53      | 0.00           | 0.31  | 6.4        | 0.55       | 0.00       |
| K <sub>2</sub> O                         | 0.06       | —     | —          | —     | —          | —     | 0.00      | 0.00           | 0.00  | 0.86       | 15.8       | 0.00       |
| NiO                                      | —          | 0.00  | 0.68       | 0.07  | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
| Σ                                        | 97.96      | 99.91 | 91.01      | 90.81 | 99.61      | 99.66 | 99.61     | 99.76          | 99.82 | 95.04      | 99.35      | 99.65      |
| Коэффициенты кристаллохимической формулы |            |       |            |       |            |       |           |                |       |            |            |            |
| Si                                       | 7.78       | —     | —          | —     | 3.00       | 3.00  | 2.00      | 1.98           | 1.97  | 7.70       | 3.00       | 0.97       |
| Ti                                       | —          | 0.01  | —          | —     | 0.01       | —     | —         | —              | —     | —          | —          | 0.88       |
| Al                                       | 0.39       | 0.04  | 0.09       | 0.04  | 1.90       | 1.90  | 0.03      | 0.03           | 0.02  | 4.30       | 1.01       | 0.14       |
| Gr                                       | —          | 0.10  | 0.36       | 0.60  | —          | —     | —         | —              | —     | —          | —          | —          |
| Fe                                       | 1.63       | 2.85  | 2.16       | 2.36  | 1.19       | 1.15  | 0.30      | 0.24           | 0.27  | 0.05       | —          | 0.01       |
| Mn                                       | 0.03       | 0.00  | 0.01       | 0.00  | 0.04       | 0.07  | 0.01      | 0.00           | 0.00  | 0.00       | —          | —          |
| Mg                                       | 5.08       | 0.00  | 0.38       | 0.00  | 0.24       | 0.18  | 0.70      | 0.75           | 0.71  | 0.00       | —          | —          |
| Ca                                       | 0.08       | —     | —          | —     | 1.62       | 1.70  | 0.92      | 1.00           | 1.01  | 2.12       | —          | 1.00       |
| Na                                       | 0.00       | —     | —          | —     | —          | —     | 0.04      | 0.00           | 0.02  | 1.89       | 0.05       | —          |
| K                                        | 0.01       | —     | —          | —     | —          | —     | 0.00      | 0.00           | —     | 0.17       | 0.94       | —          |
| #Mg                                      | 0.75       | —     | 0.15       | —     | 0.17       | 0.12  | 0.70      | 0.75           | 0.72  | —          | —          | —          |
| #Ca                                      | —          | —     | —          | —     | 0.54       | 0.57  | —         | —              | —     | —          | —          | —          |

Примечание. Индексы минералов: *Bi* – биотит, *Cal* – кальцит, *Chl* – хлорит, *Cum* – кумминтонит, *Di* – диопсид, *Dol* – доломит, *En* – энстатит, *Ed* – эденит, *Fsp* – калиевый полевой шпат, *Grt* – гранат, *Hbl* – роговая обманка, *Ky* – кианит, *Mag* – магнетит, *Ms* – мусковит, *Ol* – оливин, *Spl* – шпинель, *Scp* – скаполит, *Srp* – серпентин, *Tlc* – тальк, *Tnt* – титанит, *Tr* – тремолит, *Ts* – чермакит. Коэффициенты кристаллохимической формулы минералов рассчитаны по катионам: *Bi*, *Tlc* на 7; *Cum* на 15; *Di*, *En* на 4; *Grt* на 8; *Ed*, *Tr*, *Ts*, *Hbl* на 13; *Ms* на 6; *Ol* на 3; *Scp* на 12 (позиция T); *Chl*, *Srp* на 10. #Mg = Mg/(Mg + Fe); #Ca = Ca/(Ca + Na + K).

Note. Indexes of minerals: *Bi* – biotite, *Cal* – calcite, *Chl* – chlorite, *Cum* – cummingtonite, *Di* – diopside, *Dol* – dolomite, *En* – enstatite, *Ed* – edenite, *Fsp* – feldspar, *Grt* – garnet, *Hbl* – hornblende, *Ky* – kyanite, *Mag* – magnetite, *Ms* – muscovite, *Ol* – olivine, *Scp* – scapolite, *Srp* – serpentine, *Spl* – spinel, *Tlc* – talc, *Ttn* – titanite, *Tr* – tremolite, *Ts* – tschermakite. Structure formulae of minerals calculated on the basis of: *Bi*, *Tlc* – 7; *Cum* – 15; *Di*, *En* – 4; *Grt* – 8; *Ed*, *Tr*, *Ts*, *Hbl* – 13; *Ms* – 6; *Ol* – 3; *Scp* – 12 (position T); *Chl*, *Srp* – 10 cations. #Mg = Mg/(Mg + Fe); #Ca = Ca/(Ca + Na + K).



**Рис. 3.** Взаимоотношение минералов в ультрамафите Няшевского массива.

а – замещение оливина доломитом, серпентином и тальком; б – включение оливина и серпентина в магнетите, в – ламели рутила в магнетите, г – сросток диопсида, скаполита и калиевого полевого шпата.

**Fig. 3.** Relationship of the minerals in ultramafites of the Nyashevo massif.

а – replacement olivine by dolomite, serpentine and talc; б – including of olivine and serpentine in magnetite; в – lamellae of rutile in magnetite; г – intergrowth of diopside, scapolite and K-feldspar.

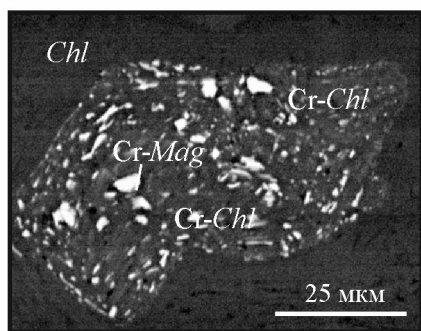
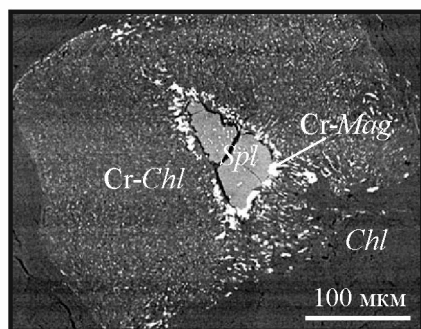
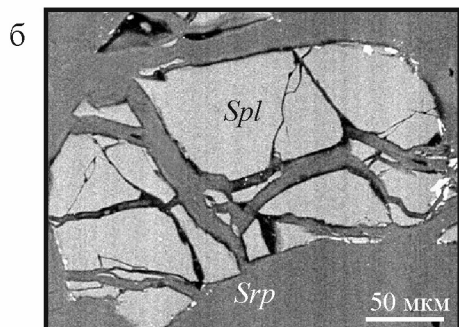
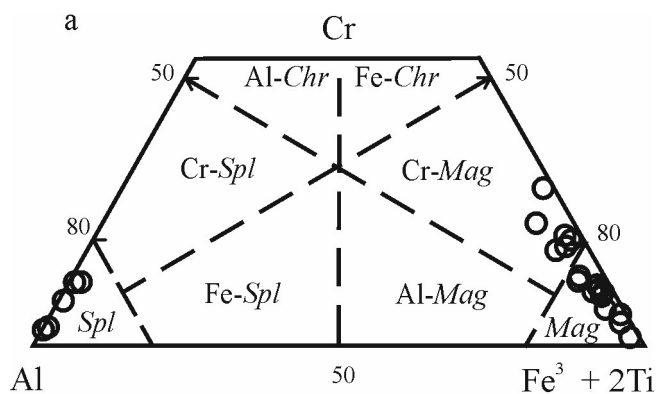
альмандиновом гранате, где представлен железистой (#Mg = 0.77) разновидностью. Однако в генетическом аспекте наибольший интерес представляют находки зерен алюмоэнстатита, содержащих 15.6–16.2 мас. %  $Al_2O_3$  [Медведева и др., 2015].

Шпинель представлена округлыми зернами размером 0.15–0.4 мм. Редкие неизмененные ее зерна имеют незначительные вариации состава, выраженные в колебании содержания хрома и магнети-

альности (см. табл. 1, рис. 4а). Зерна разбиты трещинами, выполненными лизардитом. В основном сохраняются псевдоморфозы, сложенные хроммагнетитом и кеммереритом (рис. 4б), в окружении матрикса из клинохлорпеннина.

Серпентин образует основную ткань породы и по рамановскому спектру соответствует лизардиту и хризотилу (рис. 5а). Для состава лизардита отмечается относительно повышенное со-

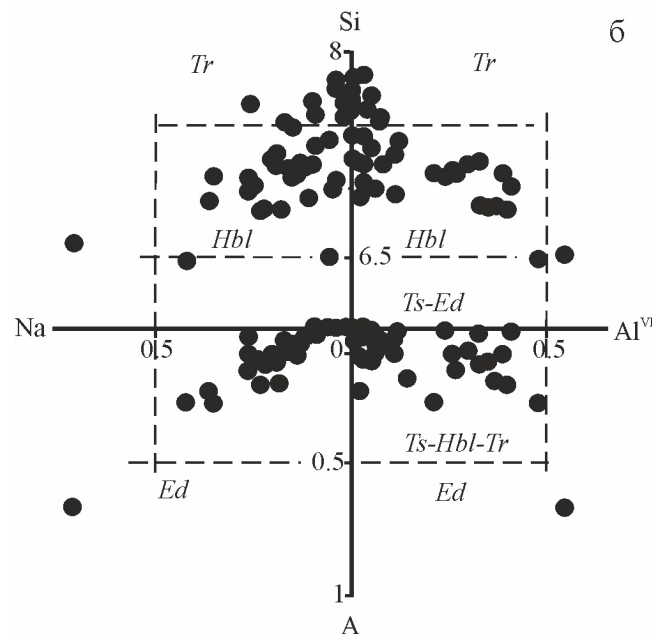
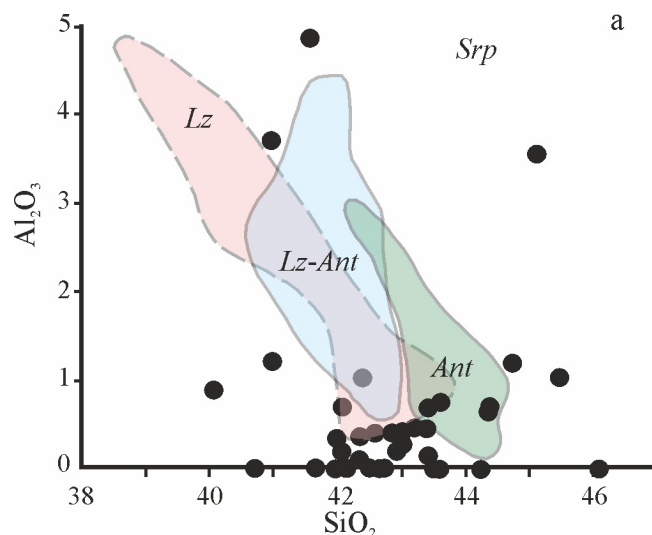




**Рис. 4.** Вариации состава шпинели–хроммагнетита–магнетита (а) (диаграмма по: [Округин, 2005]), микрофотографии псевдоморфоз по шпинели из ультрамафитов Няшевского массива (б).

**Fig. 4.** Composition of spinel–Cr-magnetite–magnetite (a) (variation diagram: [Okrugin, 2005]), microphotographies of pseudomorphs after spinel (b) from ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

держание кремнезема (3.99–4.23 к. ф.), низкое – алюминия ( $\leq 0.04$  к. ф.), хрома ( $\leq 0.01$  к. ф.), нике-



**Рис. 5.** Вариации составов серпентинов (а) амфиболов (б) в ультрамафитах Няшевского массива.

**Fig. 5.** Composition of serpentines (a) amphiboles (b) from ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

ля ( $< 0.02$  к. ф.) и незначительные колебания магнезиальности ( $\#Mg = 0.92–0.98$ ). Хризотил формирует прожилки в лизардитовой ткани. Для его состава характерно более низкое количество кремнезема (3.80–3.98 к. ф.), повышенное – алюминия (0.07–0.28 к. ф.) и магнезиальности ( $\#Mg = 0.82–0.98$ ). Отношение Si/Mg составляет 0.67–0.71 и 0.84–0.86.

Хлорит в матрице серпентинитов представлен клинохлорпением (см. табл. 1), но в зависимости от минеральной ассоциации и, вероятно, последовательности образования различается по составу. В ассоциации с тремолитом, доломитом и магнетитом клинохлорпении низкожелезистые

( $\#Mg = 0.96\text{--}0.97$ ), с низким содержанием кремнезема ( $Si^{4+} = 2.9\text{--}3.1$  к. ф.) и повышенным алюминия ( $Al = 1.5\text{--}1.9$  к. ф.). Клинохлорпеннины в ассоциации с тальком, хроммагнетитом и кварцем более железистые ( $\#Mg = 0.85\text{--}0.83$ ), с максимально высоким содержанием кремнезема ( $Si^{4+} = 3.3\text{--}4.0$  к. ф.) и низким – алюминия ( $Al = 1.0\text{--}1.5$  к. ф.). По шпинели развиты кеммерериты с содержанием от 0.14 до 0.17 к. ф. хрома, от 2.5 до 2.8 – кремнезема, от 1.9 до 2.1 к. ф. алюминия и магнезиальностью 0.92–0.96.

Тальк образует прожилки и линзы в ассоциации с кварцем. Отвечает высокомагнезиальной ( $\#Mg = 0.96\text{--}0.98$  к. ф.) разновидности, содержит до 0.04 к. ф. алюминия и до 0.01 к. ф. никеля.

Кальцит ( $Mg_{0.13\text{--}0.27}Ca_{0.72\text{--}0.87}$ ) слагает мелкие выделения и прожилки.

Хроммагнетит-магнетит образует зерна с извилистыми контурами размером от 0.01 до 1.00–1.50 мм. Отдельные его зерна содержат округлые включения оливина, разбиты трещинами, выполненными серпентином. Встречаются зерна магнетита ( $Ti_{0.01}Cr_{0.09}Fe^{3+}_{2.84}$ ) с ламелями рутила (см. рис. 3в). Вариации составов хроммагнетита-магнетита определяются колебаниями (0.08–0.63 к. ф.) хрома и (2.10–2.88 к. ф.) железа (см. рис. 4а). Хроммагнетиты содержат очень низкое количество титана (до 0.005 к. ф.) и никеля (до 0.03 к. ф.).

Амфиболы по составу соответствуют кальциевым амфиболам (см. табл. 1, рис. 5б), представлены в незначительном количестве чермакит-эденитом ( $\#Mg = 0.76$ ,  $Si^{4+}$  от 6.49 до 6.52 к. ф.,  $Al^{VI}$  от 0.48 до 0.55 к. ф.), а в основном роговой обманкой и тремолитом. По особенностям состава они представляют непрерывный ряд при вариации  $\#Mg$  от 0.83 до 0.98,  $Si^{4+}$  от 6.85 до 7.77 к. ф. и  $Al^{VI}$  до 0.39 к. ф. (см. рис. 5б). Зерна роговой обманки имеют серпентиновую кайму, а зерна тремолита – доломит-серпентиновую или доломит-серпентинхлоритовую.

Гранат обнаружен в пробах протолочках ультрамафитов Няшевского, Булдымского и Карабашского массивов. Исследовано более 50 зерен. Основная часть (более 80% кристаллов) изученного граната имеет состав  $Py\text{--}Alm$  ( $Py_{18\text{--}26}Alm_{60\text{--}68}Sps_{8\text{--}12}Grs_{3\text{--}4}$ ) с низким содержанием кальция и повышенным – марганца. Зерна имеют серпентиновую, серпентинтальковую и хлоритовую оторочку (кайму). Некоторые зерна имеют шестигранные и округлые включения кварца. В отдельных зернах  $Py\text{--}Alm$  встречены включения: энстатита ( $\#Mg = 0.77$ ,  $Ca = 0.04$  к. ф.) и циркона; биотита ( $\#Mg = 0.65$ ,  $Ti = 0.20$  к. ф.) и кианита; мусковита ( $Si^{4+} = 3.13$  к. ф.,  $\#Mg = 0.45$ ) с кварцем (см. табл. 1, рис. 6).

Альмандин ( $Py_{4\text{--}5}Alm_{60\text{--}68}Sps_{9\text{--}10}Grs_{23\text{--}25}$ ), составляя до 8% кристаллов, имеет неоднородность, повышенное количество кальция и магния при уменьшении железа от центра к краю. Отличается по составу от Са-альмандина ( $Py_{11\text{--}14}Alm_{59\text{--}63}Sps_{2\text{--}4}Grs_{22\text{--}23}$ )

амфиболитов более высоким содержанием Mn, Fe и низким – Mg.

Иногда обнаруживаются редко встречающиеся в природе Fe-Са гранаты, соответствующие альмандин-гроссуляру ( $Py_{6\text{--}8}Alm_{34\text{--}37}Sps_{1\text{--}3}Grs_{54\text{--}57}$ ,  $\#Mg = 0.12\text{--}0.17$ ) с низким содержанием пиропового и спессартинового компонентов.

Ассоциация диопсид + скаполит + калиевый полевой шпат ± гранат встречается в серпентинитах по узким зонам и отражает поздние процессы проявления как в серпентинитах, так и в разных породах Ильменогорского комплекса. На фотографии (см. рис. 3г) видно, что диопсид образует срастания со скаполитом и калиевым полевым шпатом, содержит включения доломита. Диопсид по составу ( $\#Mg = 0.70\text{--}0.75$ ,  $Al = 0.02\text{--}0.03$  к. ф.,  $Na \leq 0.04$  к. ф.) сопоставим с диопсидом из апоамфиболитовых скаполитовых пород комплекса. Скаполит содержит до 51 мол. % мейонитового компонента.

#### P-T УСЛОВИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УЛЬТРАМАФИТОВ

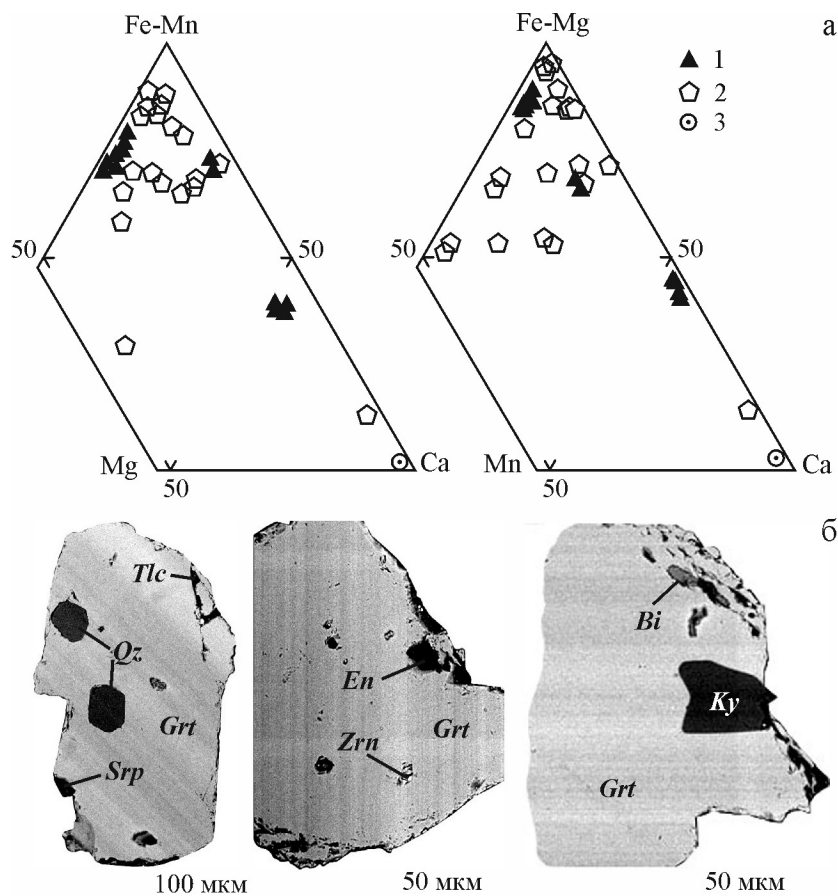
Обнаружение в породах НМ редко встречающихся в природе Fe-Са гранатов гроспидитового типа и алюмоэнстатитов с 15–16 мас. %  $Al_2O_3$  позволяет предполагать их образование в глубинных мантийных условиях, которые в соответствии с экспериментальными данными могут быть оценены значениями давления до 30–40 кбар и температуры более 1000°C [Грин, 1970; Русин и др., 2010, 2012; Медведева и др., 2015].

Энстатит из включений в пироп-альмандиновом гранате содержит кальций до 0.04 к. ф. и октаэдрический алюминий до 0.13 к. ф., что позволяет по содержанию данных элементов [Brey, Kohler, 1990] определить температуру его формирования в интервале 996–1048°C и давление от 5 до 10 кбар.

$K_D$  железо-магнезиальных элементов в оливине-шпинели равен 2.26–2.29 по геотермометру [Fabries, 1979] температура их образования оценивается в 554°C. Однако шпинель по особенностям состава сопоставима с таковой ( $Al_{85\text{--}90}Cr_{9\text{--}14}Mg_{\#77\text{--}80}$ ) шпинелевых перидотитов массивов Rondo и др. [Obata, 1980; Dick, Bullen, 1984; Bonatti et al., 1986], температура образования которой 850–900°C.

Формирование пироп-альмандинового-альмандинового граната по  $Grt\text{--}Bi$  и  $Grt\text{--}Ms$  геотермометром [Ravna, Paguin, 2003] происходило при  $T = 643\text{--}652^\circ\text{C}$  при  $P \leq 6$  кбар и  $T = 696^\circ\text{C}$  при  $P \leq 4$  кбар соответственно, т. е. метаморфизм ультрамафитов на одном из этапов преобразования отвечал низам гранулитовой-амфиболитовой фаций.

Формирование кальциевых амфиболов в ряду чермакит-эденит-роговая обманка-тремолит оценивается температурой от 630 до 425°C и  $P > 5$  кбар [Мишкин, 1990; Perchuk, 1990].



**Рис. 6.** Вариации составов гранатов (а) и микрофотографии зерен граната (б) с минеральными включениями.

1 – гранаты из ультрамафитов Няшевского массива, 2 – гранаты из ультрамафитов Карабашского массива, 3 – гранаты из ультрамафитов Будымского массива.

**Fig. 6.** Composition of garnets (a) and photomicrographs of the garnet's grains (б) with including of minerals.

1 – garnets from ultramafic rocks of the Nyashevo massif, 2 – garnets from ultramafic rocks of the Karabash massif, 3 – garnets from ultramafic rocks of the Buldym massif.

Процесс скаполитизации в серпентинитах по диопсиду-альмандин-гроссуляру и титаниту ( $Al = 0.14$  к. ф.) протекал при температуре  $\geq 589^\circ C$  и давлении  $\approx 7$  кбар.

Позднее оталькование, образование тальк-кварцевых и тальк-кварц-хлоритовых пород, а также карбонатизация (замещение оливина и тремолита доломитом) серпентинитов происходили при температуре около  $400^\circ C$ .

Таким образом, можно утверждать, что многоэтапные преобразования ультрамафитов НМ характеризовались отчетливо выраженным декомпрессионным трендом, эволюционирующим от мантийных ультравысокопараметрических до коровых LT-HP условий в постколлизивной сдвиговой зоне.

#### ПЕТРОГЕОХИМИЯ

Серпентиниты НМ имеют вариации содержания кремнезема от 38.0 до 42.0 мас. % и #Mg – от

0.89 до 0.92, незначительные концентрации алюминия – от 0.6 до 2.0 мас. % и кальция – от 0.3 до 2.8 мас. %. Они обладают относительно невысоким содержанием магния (30.0–38.0 мас. %), высоким – хрома (550–2400 г/т) и никеля (800–2000 г/т), низким – титана (до 75 г/т) (табл. 2). Соотношение  $Al_2O_3/SiO_2$  составляет 0.01–0.05,  $MgO/SiO_2$  – 0.6–1.0,  $CaO/Al_2O_3$  – 0.4–1.5, что позволяет рассматривать их как серпентинизированный гарцбургит.

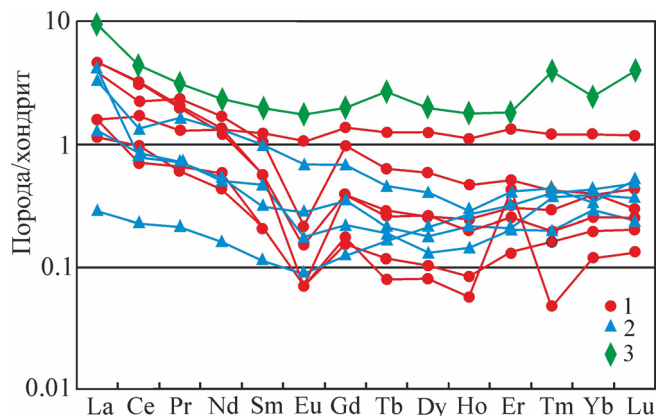
Содержание редких элементов в серпентинитах низкое (6.0–117.4 г/т) при концентрации ниобия 0.002–1.090 г/т и циркония 0.7–2.5 г/т. Следует отметить сравнительно высокое содержание в них Rb = 0.10–0.57 г/т, Sr = 3.0–42.0, Ba = 3.0–95.0 г/т,  $Ba/Sr = 0.4$ –7.7. Они характеризуются относительно низким содержанием редкоземельных элементов ( $\Sigma = 1.3$ –4.3 г/т) при соотношении La/Nb 2.0–28.0 и La/Nd 0.6–2.0. В спектре распределения редкоземельных элементов (рис. 7) наблюдается преобладание ЛРЗЭ над ТРЗЭ при отрицательном тренде.



**Таблица 2.** Содержание петрогенных (мас. %), редких и редкоземельных (г/т) элементов в ультрамафитах Няшевского массива

**Table 2.** Contents of major (wt %), trace and rare earth (ppm) elements for ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

| Компо-<br>нент                 | 1     | 2      | 3     | 4     | 5      | 6      | 7     |
|--------------------------------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 39.2  | 39.9   | 37.4  | 38.5  | 48.3   | 39.4   | 42.2  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.05  | 0.03   | 0.04  | 0.09  | 0.04   | 0.03   | 0.05  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.31  | 0.55   | 1.05  | 2.00  | 0.90   | 0.60   | 0.71  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.13  | 6.31   | 5.26  | 6.08  | 4.11   | 5.87   | 5.47  |
| FeO                            | 1.10  | 1.26   | 1.82  | 1.94  | 0.60   | 1.46   | 1.80  |
| MnO                            | 0.11  | 0.13   | 0.13  | 0.11  | 0.04   | 0.11   | 0.12  |
| MgO                            | 37.52 | 36.1   | 38.2  | 34.6  | 30.2   | 38.0   | 38.1  |
| CaO                            | 0.56  | 0.81   | 0.73  | 2.80  | 0.34   | 0.54   | 0.58  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.07  | <0.01  | <0.01 | 0.04  | 0.02   | <0.01  | 0.05  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.02  | 0.03   | 0.02  | 0.03  | 0.06   | 0.03   | 0.05  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | —     | 0.50   | 0.06  | 0.05  | 0.06   | 0.05   | 0.05  |
| CO <sub>2</sub>                | —     | 0.80   | 0.44  | 1.52  | 0.07   | 0.42   | 0.40  |
| n.n.n.                         | 13.7  | 14.9   | 14.7  | 12.8  | 15.4   | 13.5   | 10.9  |
| Σ                              | 99.66 | 100.5  | 99.86 | 100.6 | 100.1  | 100.0  | 100.5 |
| Li                             | —     | 0.33   | 5.11  | 0.63  | 4.07   | 0.70   | 2.45  |
| Be                             | 0.039 | 0.025  | 0.168 | 0.131 | 0.025  | 0.022  | 0.033 |
| Sc                             | 5.16  | 6.64   | 5.63  | 7.76  | 7.44   | 5.85   | 5.08  |
| V                              | 25.6  | 32.0   | 19.2  | 39.8  | 32.4   | 19.0   | 19.6  |
| Cr                             | 1772  | 2307   | 555   | 1638  | 861    | 2376   | 1226  |
| Co                             | 95.2  | 99.9   | 82.2  | 88.6  | 43.5   | 101    | 82.7  |
| Ni                             | 1550  | 2014   | 1766  | 1674  | 819    | 2016   | 1856  |
| Cu                             | 6.2   | 9.93   | 16.7  | 3.05  | 2.78   | 20.6   | 11.4  |
| Zn                             | 38.8  | 22.2   | 28.9  | 19.6  | 6.70   | 38.0   | 24.4  |
| Ge                             | —     | 1.25   | 1.20  | 1.29  | 0.82   | 1.12   | 1.09  |
| Rb                             | 0.10  | 0.133  | 0.183 | 0.40  | 5.24   | 0.57   | 0.40  |
| Sr                             | 2.6   | 35.8   | 17.7  | 42.1  | 12.4   | 22.6   | 40.0  |
| Y                              | 0.26  | 0.26   | 0.85  | 1.74  | 0.114  | 0.165  | 0.41  |
| Zr                             | 0.00  | 1.71   | 1.72  | 2.46  | 0.93   | 1.29   | 0.73  |
| Nb                             | 0.003 | 1.09   | 0.059 | 0.54  | 0.188  | 0.002  | 0.089 |
| Mo                             | 0.09  | 0.153  | 0.44  | 0.129 | 0.023  | 0.24   | 0.37  |
| Cd                             | —     | 0.023  | 0.107 | 0.074 | <0.006 | 0.060  | 22.0  |
| Sn                             | —     | 0.23   | 0.50  | 0.30  | 0.21   | 0.32   | 0.27  |
| Cs                             | 0.006 | <0.001 | 0.027 | 0.022 | 0.96   | 0.24   | 0.027 |
| Ba                             | 2.88  | 14.7   | 19.7  | 18.9  | 95.1   | 15.2   | 27.4  |
| La                             | 0.280 | 1.13   | 0.94  | 0.38  | 0.37   | 0.28   | 1.13  |
| Ce                             | 0.44  | 2.04   | 1.41  | 1.08  | 0.44   | 0.61   | 1.97  |
| Pr                             | 0.06  | 0.20   | 0.22  | 0.122 | 0.062  | 0.058  | 0.190 |
| Nd                             | 0.25  | 0.63   | 0.80  | 0.62  | 0.27   | 0.20   | 0.58  |
| Sm                             | 0.04  | 0.086  | 0.159 | 0.187 | 0.032  | 0.032  | 0.087 |
| Eu                             | 0.02  | <0.004 | 0.012 | 0.061 | <0.004 | <0.004 | 0.009 |
| Gd                             | 0.04  | 0.078  | 0.196 | 0.274 | 0.035  | 0.031  | 0.079 |
| Tb                             | 0.01  | 0.010  | 0.023 | 0.046 | 0.003  | 0.004  | 0.011 |
| Dy                             | 0.04  | 0.066  | 0.146 | 0.313 | 0.020  | 0.026  | 0.064 |
| Ho                             | 0.01  | 0.011  | 0.026 | 0.063 | 0.003  | 0.005  | 0.014 |
| Er                             | 0.03  | 0.042  | 0.083 | 0.216 | 0.069  | 0.021  | 0.050 |
| Tm                             | 0.01  | 0.005  | 0.011 | 0.031 | 0.001  | 0.004  | 0.007 |
| Yb                             | 0.03  | 0.042  | 0.065 | 0.198 | 0.019  | 0.032  | 0.063 |
| Lu                             | 0.007 | 0.006  | 0.007 | 0.029 | 0.003  | 0.005  | 0.011 |
| Hf                             | —     | 0.017  | 0.052 | 0.052 | 0.010  | 0.020  | 0.009 |
| Ta                             | —     | 0.034  | 0.008 | 0.025 | 0.016  | 0.063  | 0.016 |
| W                              | 0.05  | 0.060  | 0.29  | 0.102 | 0.38   | 0.188  | 0.131 |
| Th                             | 0.009 | 0.035  | 0.28  | 0.049 | 0.018  | 0.061  | 0.057 |
| U                              | 0.15  | 0.107  | 0.39  | 0.167 | 1.64   | 0.25   | 0.26  |



**Рис. 7.** Спектры распределения РЗЭ в ультрамафитах Няшевского (1), Карабашского (2) и Булдымского (3) массивов. Все элементы нормированы на хондрит [McDonough, Sun, 1995].

**Fig. 7.** Chondrite-normalized [McDonough, Sun, 1995] REE pattern for ultramafic rocks of the Nyashevo (1), the Karabash (2) and the Buldym (3) massifs.

Сглаженный минимум в области СРЗЭ осложнен отрицательной Eu-аномалией. В субщелочных породах массива содержание редких элементов и РЗЭ возрастает на два порядка и становится сопоставимым с концентрациями в сиенит-карбонатитовой ассоциации [Медведева и др., 2015], при этом сохраняется подобие кривых распределения во всех типах породных ассоциаций.

### ИЗОТОПНО-ХРОНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИРКОНА

Данные минералого-геохимического и изотопно-хронологического исследования циркона (табл. 3) вводят временную координату в длительную и многоэтапную историю формирования НМ [Краснобаев и др., 2016]. На рис. 8 представлены основные разновидности цирконов серпентинитов. Сосуществуют как однородные зерна, так и гетерогенные, одни с реликтами первичного строения, другие со следами вторичных изменений. Это проявляется в возникновении у них трещиноватых зон (кр. А), трещин со смещением отдельных частей кристаллов (кр. Б), сосуществованием фрагментов, возникших после дробления (кр. В, Г). Последние

Примечание. 1–3 – серпентинит с реликтами *Ol* и *En* (обр. № М-07-6, НШ 1-14, НШ 24-14), 4–5 – магнетит-серпентиновые (обр. № НШ 37-14, НШ 4-14), 6–7 – магнетит-хлоритовые (обр. № НШ 10-14; НШ 19-14) серпентиниты. Прочерк – нет данных.

Note. 1–3 – serpentinite with relicts of *Ol* and *En* (sample № М-07-6, НШ 1-14, НШ 24-14), 4–5 – magnetite-serpentine (sample № НШ 37-14, НШ 4-14), 6–7 – magnetite-chlorite (sample № НШ 10-14; НШ 19-14) serpentinites. Dash – no data.

Таблица 3. U-Pb возраст цирконов из ультрамафита Няшевского массива

Table 3. U-Pb dating of zircons from ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

| Анализ<br>кратер | $^{206}\text{Pb}_c$ ,<br>% | Содержание, г/г |     |                     | $^{232}\text{Th}$ /<br>$^{238}\text{U}$ | Возраст,<br>млн лет (1) | D,<br>% | Изотопные отношения                   |         |                                    |         |                                    |         | Rho   |
|------------------|----------------------------|-----------------|-----|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------|---------|---------------------------------------|---------|------------------------------------|---------|------------------------------------|---------|-------|
|                  |                            | U               | Th  | $^{206}\text{Pb}^*$ |                                         |                         |         | $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ | $\pm\%$ | $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ | $\pm\%$ | $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ | $\pm\%$ |       |
| 1.1              | 1.46                       | 54              | 12  | 2.1                 | 0.22                                    | $275 \pm 7$             | 84      | 0.0574                                | 16      | 0.345                              | 16.0    | 0.0436                             | 2.5     | 0.158 |
| 1.2              | 0.84                       | 86              | 87  | 3.55                | 1.05                                    | $299.3 \pm 8.8$         | -17     | 0.0511                                | 8.8     | 0.335                              | 9.3     | 0.0475                             | 3.0     | 0.324 |
| 2.1              | 1.61                       | 50              | 47  | 2.0                 | 0.96                                    | $289 \pm 7$             | 62      | 0.0560                                | 20      | 0.356                              | 20.0    | 0.0458                             | 2.5     | 0.129 |
| 2.2              | 2.45                       | 45              | 14  | 1.8                 | 0.33                                    | $282 \pm 8$             | 26      | 0.0540                                | 24      | 0.331                              | 24.0    | 0.0447                             | 3.0     | 0.124 |
| 3.1              | 0.03                       | 748             | 173 | 155.0               | 0.24                                    | $1397 \pm 13$           | 31      | 0.1121                                | 0.6     | 3.741                              | 1.2     | 0.2420                             | 1.1     | 0.878 |
| 3.2              | 0.00                       | 199             | 80  | 31.2                | 0.41                                    | $1082 \pm 13$           | 61      | 0.1066                                | 1.9     | 2.686                              | 2.3     | 0.1828                             | 1.3     | 0.574 |
| 3.3              | 0.19                       | 714             | 157 | 26.3                | 0.23                                    | $270 \pm 3$             | -2      | 0.0515                                | 2.6     | 0.3041                             | 2.9     | 0.0428                             | 1.2     | 0.418 |
| 4                | 2.38                       | 73              | 11  | 2.9                 | 0.15                                    | $284 \pm 7$             | 28      | 0.0540                                | 23      | 0.334                              | 23.0    | 0.0450                             | 2.5     | 0.112 |
| 5.1              | 0.10                       | 526             | 444 | 32.5                | 0.87                                    | $448 \pm 11$            | 1       | 0.0559                                | 1.5     | 0.555                              | 3.0     | 0.0719                             | 2.6     | 0.873 |
| 5.2              | 0.95                       | 126             | 67  | 7.7                 | 0.55                                    | $441 \pm 7$             | 1       | 0.0559                                | 9       | 0.545                              | 9.2     | 0.0707                             | 1.7     | 0.181 |
| 6.1              | 0.89                       | 370             | 161 | 15.8                | 0.45                                    | $309 \pm 4$             | 39      | 0.0554                                | 5.9     | 0.376                              | 6.0     | 0.0492                             | 1.4     | 0.229 |
| 6.2              | 0.00                       | 29              | 23  | 1.13                | 0.83                                    | $282.5 \pm 9.6$         | -18     | 0.0508                                | 6.3     | 0.314                              | 7.2     | 0.0448                             | 3.5     | 0.484 |
| 7                | 0.00                       | 38              | 31  | 1.64                | 0.84                                    | $313 \pm 10$            | 23      | 0.0544                                | 7.1     | 0.373                              | 7.9     | 0.0497                             | 3.4     | 0.427 |
| 8                | 0.00                       | 58              | 54  | 2.19                | 0.97                                    | $276.2 \pm 8.3$         | 14      | 0.0527                                | 4.5     | 0.318                              | 5.4     | 0.0438                             | 3.1     | 0.566 |
| 9.1              | 2.46                       | 863             | 547 | 43.4                | 0.65                                    | $357.7 \pm 9.2$         | 69      | 0.0601                                | 7.4     | 0.472                              | 7.8     | 0.0570                             | 2.6     | 0.338 |
| 9.2              | 0.00                       | 281             | 5   | 10.5                | 0.02                                    | $275.9 \pm 7.3$         | -2      | 0.0517                                | 2.1     | 0.311                              | 3.4     | 0.0437                             | 2.7     | 0.788 |

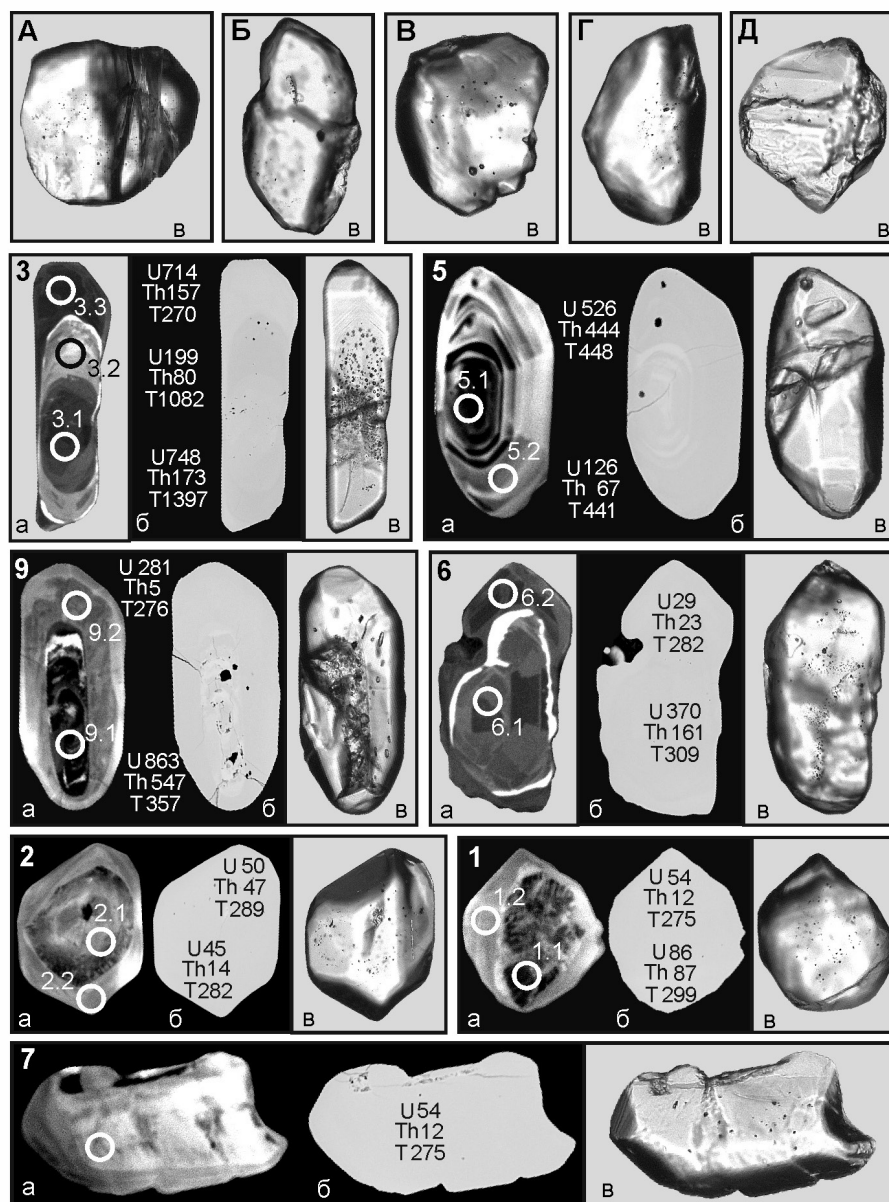
Примечание.  $\text{Pb}_c$  и  $\text{Pb}^*$  – общий и радиогенный свинец. (1) – коррекция по  $^{204}\text{Pb}$ . Rho – коэффициент корреляции. D – дискордантность. Ошибка калибровки стандарта 0.45 %.

Note.  $\text{Pb}_c$  and  $\text{Pb}^*$  – stability and radioactive isotopes. (1) – correction by  $^{204}\text{Pb}$ . Rho – correlation coefficient. D – discordance. Error calibration sample standard 0.45%.

иногда сохраняют останцы линейных (реберных) участков граней первичного облика (кр. В, Г), дополненные новообразованными разрозненными выростами (кр. В) или оболочками (кр. Б). У отдельных зерен сохранились специфические особенности рельефа поверхностного скола (кр. Д). По-видимому, можно констатировать, что разнообразие морфологических типов цирконов серпентинитов НМ во многом определяется сочетанием следов их деформационных изменений, т. е. тектонической историей пород. Минералогическое разнообразие цирконов НМ дополняют кристаллы, для которых получена изотопная информация (см. рис. 8). Здесь более отчетливо просматриваются признаки и идиоморфизма (кр. 2, 5), и дробления (кр. 1, 3, 6, 7), и растворения (кр. 1, 6, 7), а особенно – полигенности, причем следы в различной степени измененных ранних генераций наблюдаются практически у всех исследованных зерен. У кристаллов 1, 2, 7 они проявляются в виде “затемненных” частей (CL) в центральных зонах, иногда мало отличаясь от периферических. Рекристаллизация, отмеченная единичными выростами у кристалла В, проявилась в виде новообразованных головок у кристаллов 1 и 6. Точечные включения указывают или на контуры замещенных более ранних генераций (кр. 3), или на зоны залеченных трещин (кр. 6).

Взаимоотношения U-Th, и U-T (по  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ) в цирконах показаны на рис. 9. Прежде всего обращает на себя внимание отсутствие единой геохимиче-

ской системы (единого геохимического пространства), которая бы объединяла их в единое сообщество однотипных кристаллов на основе прямой корреляционной взаимозависимости U и Th. Основной причиной такой “аномалии” может быть связь кристаллов с разными или источниками, или процессами цирконообразования. Тем не менее, общей весьма специфической особенностью, свойственной практически всем кристаллам, является снижение содержания Th и в меньшей мере U у поздних генераций. При использовании (см. рис. 9) возрастных данных следует учитывать их ограниченные возможности из-за повышенной дискордантности изотопных отношений (см. табл. 3), при сопоставлении зерен они в большей мере играют роль дополнительных геохимических индикаторов. С учетом такого сочетания появляется возможность говорить, по крайней мере, о трех вариантах взаимоотношений U и Th в сосуществующих цирконах. Первый (I) объединяет тенденция снижения Th и возраста (кр. 3.1-3.2, 5.1-5.2, 6.1-6.2) под влиянием поздних процессов; второй (II) проявляется благодаря “внутренним” вариациям состава среди наиболее молодых разновидностей (2.1-2.2, 1.1-1.2, отчасти 4 и 7); третий (III), на примере кристалла 9, отражает максимальные изменения ториевости между зернами с разными датировками. Заключительная генерация кристалла 3 (3.3) отражает не только влияние самых поздних цирконообразующих процессов на ранние генерации, но и выявляет наличие инверсии в U-Th эволюции составов цирконов.



**Рис. 8.** Минералого-геохимические особенности цирконов ультрамафитов Няшевского массива.

Цифры – номера кристаллов, кратеров; U и Th, г/г; Т – возраст, млн лет, по  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  – (см. табл. 3); а – CL, б – BSE, в – оптика, проходящий свет,  $\times 100$ –1500. Вверху – разновидности зерен цирконов из серпентинитов.

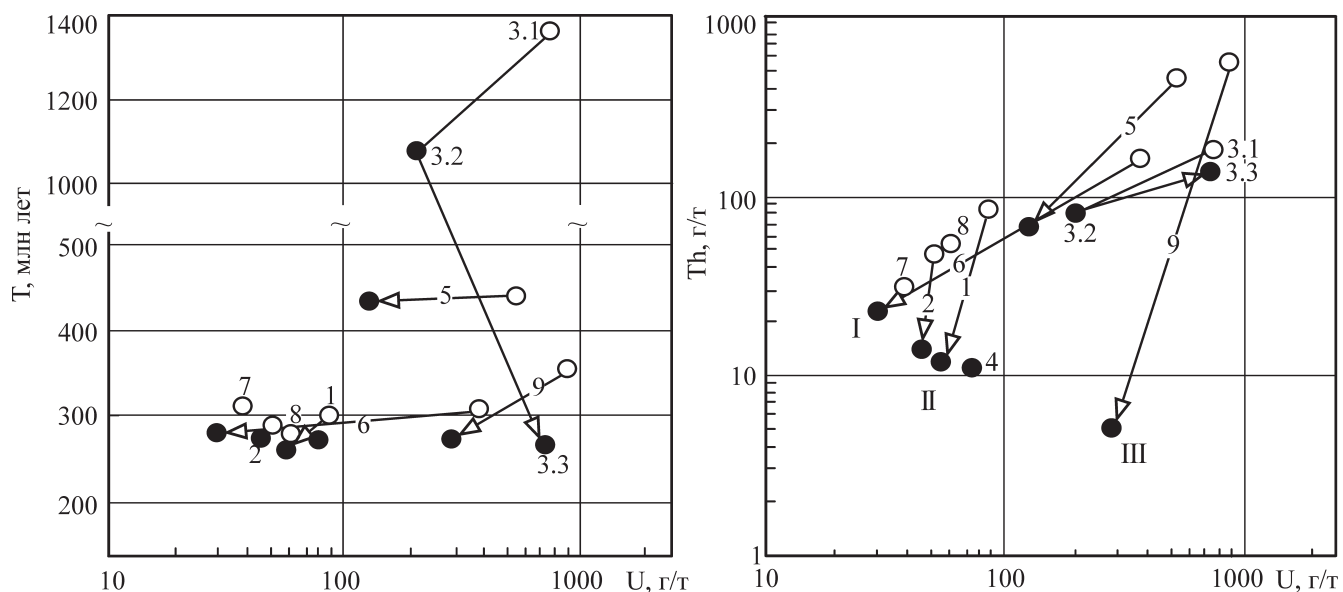
**Fig. 8.** The mineralogical and geochemical characteristics of zircons from ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

The numbers are the numbers of crystals, craters; U and Th, ppm; T – age, Ma, by  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  – Table. 3; a – CL-image, б – BSE-image, в – plain polarized light,  $\times 100$ –1500. Above – varieties of zircon grains from serpentinites.

Датировки цирконов, отвечающие времени их образования, представлены на рис. 10. Возраст кристалла 3 по верхнему пересечению дискордии  $T_0 = 1892 \pm 23$  млн лет, а возраст его метаморфизма (диафтореза) существенно моложе  $t_0 = 271 \pm 12$  млн лет. Уверенно фиксируются процессы образования ранних–поздних генераций кристалла 5 (5.1–5.2) единой датировкой  $T_1 = 443 \pm 12$  млн лет. Для частично преобразо-

ванных частей кристаллов (1.1, 6.1, 7.1) наиболее вероятен “промежуточный” возраст  $T_2 = 308.2 \pm 3.6$  млн лет. Наконец, все поздние разновидности цирконов, объединяющие и максимально измененные предшествующие разности, и оболочки вокруг них характеризуются конкордантной датировкой  $T_3 = 275.8 \pm 2.1$  млн лет. В совокупности эти данные позволяют оценить длительность существования ультрабазитовой субстанции, с кото-



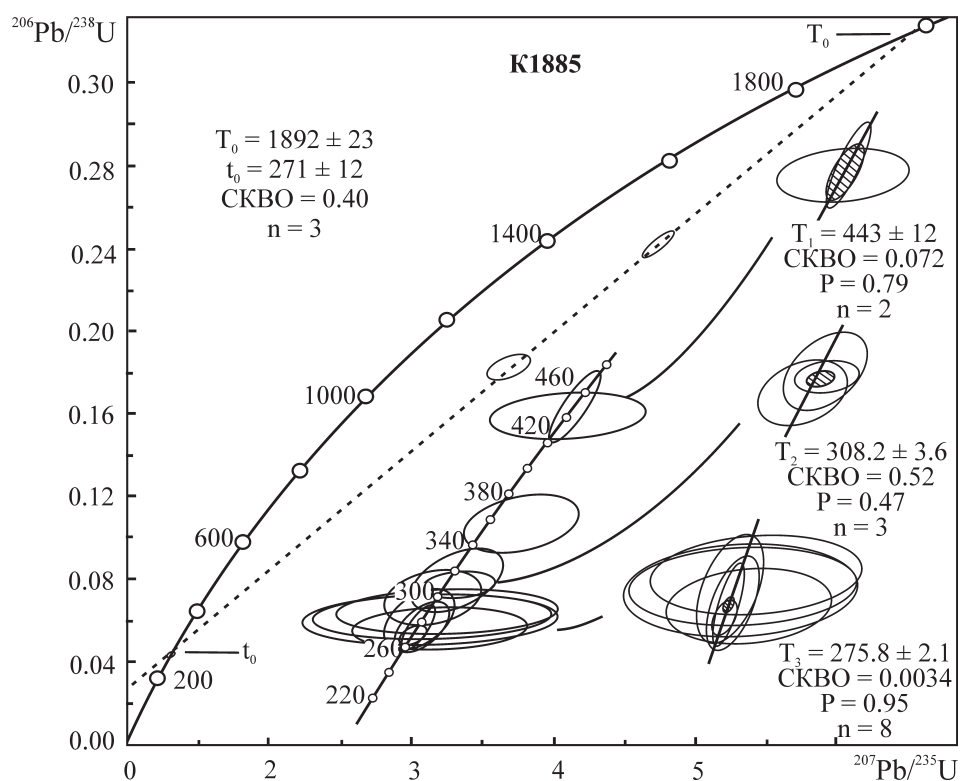


**Рис. 9.** Корреляционные соотношения U (г/г)–Т (по  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , млн лет) и U–Th (г/г) в цирконах ультрамафитов Няшевского массива.

Стрелками соединены последовательные генерации гетерогенных кристаллов. Остальные пояснения см. в тексте.

**Fig. 9.** U (ppm)–T ( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , Ma) and U–Th (ppm ratio) plots for zircons from ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

Arrows connect consistent generation of heterogeneous crystals. For other explanations, see the text.



**Рис. 10.** U-Pb (SHRIMP) возраст цирконов ультрамафитов Няшевского массива.

**Fig. 10.** The U-Pb (SHRIMP) age of zircons from ultramafic rocks of the Nyashevo massif.

рой связаны процессы образования и преобразования гипербазитов НМ, в 1.5–1.6 млрд лет.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И НЕКОТОРЫЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Дискуссионность представлений о природе Няшевского мафит-ультрамафитового массива связана с очень низкой сохранностью в его породных ассоциациях исходных парагенезисов, возникших на ранних этапах его формирования. Вместе с тем обнаружение в породах в акцессорных количествах очень редких алмандин-гроссуляровых гранатов и высокоглиноземистых алюмоэнстатитов позволяет полагать, что они образовывались при ультравысоких давлениях и температурах, которые могли быть реализованы только в глубокой субконтинентальной мантии. Это предположение подтверждается данными по составам шпинели серпентинитов, которая по высокой глиноземистости и вариации магнетиальности (0.72–0.75) сопоставима со шпинелью шпинелевых лизардитов (например, массивов Ronda, Zabergad и др.), формировавшейся при температуре 850–1050°C и давлении  $\geq 9$  кбар [Fabries, 1979; Obata, 1980; Dick, Bullen, 1984; Bonatti et al., 1986]. К реликтовому минералу можно отнести и энстатит из включений в гранате, отражающий наиболее высокий градиент температуры (до 1050°C) преобразования ультрамафитов.

В ультрамафитах массива определен широкий спектр минералов (гранат, биотит, мусковит, амфибол, кианит и др.), которые указывают на многоэтапность метаморфических преобразований. Особенности состава минералов отражают изменение  $P$ - $T$  условий метаморфизма от гранулитовой до зеленосланцевой фаций, происходившее при декомпрессионном подъеме ультрамафитового материала из глубинного мантийного источника.

Информация о глубинных источниках вещества НМ содержится в петрогеохимических данных. Подobie кривых распределения редких и РЗЭ в главных породных ассоциациях и сопоставимость их концентраций с миаскит-карбонатитовой ассоциацией [Медведева и др., 2015], а также Lu-Hf изотопная систематика цирконов Ильмено-Вишневогорского комплекса [Недосекова и др., 2014] позволяют полагать, что щелочно-карбонатитовый магматизм был обусловлен функционированием глубинных мантийных плюмов. Временные координаты этих событий отмечаются цирконовыми возрастами главных породных ассоциаций.

Последовательность возрастных этапов у сосуществующих цирконов согласуется и с их геохимическими вариациями (см. рис. 9), и с возрастными координатами вмещающих НМ пород. Мезопротерозойский ( $T_0$ ) возраст цирконов серпентинитов сопоставим с хорошо известными датировками метаморфических пород селянkinской толщи, фе-

нитов и амфиболитов Ильменских гор [Краснобаев и др., 2001, 2011а, б, в]. Верхнеордовикский ( $T_1$ ) рубеж цирконообразования практически совпадает с максимальными цифрами возраста миаскитов, карбонатитов и, что особенно важно, гипербазитов Булдымского щелочно-карбонатитового массива [Краснобаев и др., 2014, 2015; Недосекова и др., 2014]. Некоторые разновидности цирконов последнего практически не отличаются ни по облику, ни по геохимически-возрастным особенностям от цирконов няшевских серпентинитов. Пермская ( $T_3$ ) датировка цирконов НМ уверенно коррелируется с возрастными параметрами цирконов поздних разновидностей миаскитов, карбонатитов, гипербазитов, гранитоидов и разнообразных тел пегматитов. По сути, широко проявленный возрастной импульс  $T_3$  отражает начало завершающей эволюции разновозрастных, от протерозойских до мезозойских, пород Ильмено-Вишневогорского комплекса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банева Н.Н., Русин А.И. (2014) Структурно-вещественная эволюция и изотопный возраст Ильмено-Вишневогорского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, (2), 131–137.
- Варлаков А.С. (1995) Рифтогенные офиолиты, метаморфизм гипербазитов и строение Вишневогорского-Ильменогорского комплекса. Миасс: ИМин УрО РАН, 67 с.
- Варлаков А.С., Кузнецов Г.П., Кораблев Г.Г., Муркин В.П. (1998) Гипербазиты Вишневогорско-Ильменогорского метаморфического комплекса (Южный Урал). Миасс: ИМин УрО РАН, 195 с.
- Грин Т.Х. (1970) Экспериментальное исследование ассоциаций субсолидуса, образующихся при высоких давлениях за счет высокоглиноземистых базальтов, кианитовых эклогитов и гроспидитов. *Происхождение главных серий изверженных пород по данным экспериментальных исследований*. Л.: Недра, 21–52.
- Краснобаев А.А., Аникина Е.В., Русин А.И. (2011а) Цирконология дунитов Нижнетагильского массива (Средний Урал). *Докл. АН*, **436**(6), 809–813.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Анфилов В.Н., Медведева Е.В., Бушарина С.В., Мурдасова Н.М. (2016) Цирконология серпентинитов Няшевского массива (Южный Урал). *Докл. АН*, **471**(6), 703–707.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Русин А.И., Бушарина С.В., Медведева Е.В. (2011б) Цирконология фенитов Ильменских гор. *Докл. АН*, **440**(1), 100–104.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Русин А.И., Бушарина С.В., Медведева Е.В. (2015) Цирконология гипербазитов Булдымского массива (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Южный Урал). *Докл. АН*, **461**(1), 63–69.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Русин А.И., Бушарина С.В., Медведева Е.В., Родионов Н.В. (2011в) Цирконология амфиболитов селянkinской толщи Ильменских гор (Южный Урал). *Докл. АН*, **441**(5), 661–665.
- Краснобаев А.А., Давыдов В.А., Шулькин Е.П., Чердынченко Н.В. (2001) Цирконология селянkinского

- блока Ильменских гор. *Докл. АН*, **379**(6), 807-811.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Бушарина С.В., Родионов Н.В. (2014) Цирконология ультрамафитов Восточно-Тагильского массива (Средний Урал). *Докл. АН*, **455**(5), 567-571.
- Левин В.Я. (1974) Щелочная провинция Ильменских-Вишневых гор на Урале. М.: Наука, 223 с.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П. (1997) Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 274 с.
- Медведева Е.В., Немов А.Б., Котляров В.А. (2015) Метасоматиты основного и среднего состава из Няшевского серпентинитового массива (Ильменские горы, Южный Урал). *Литосфера*, (6), 53-68.
- Мишкин М.А. (1990) Амфиболовый геотермобарометр для метабазитов. *Докл. АН СССР*, **312**(4), 944-946.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Беляцкий Б.В. (2014) U-Pb возраст и Lu-Hf изотопные системы цирконов Ильмено-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса, Южный Урал. *Литосфера*, (5), 19-32.
- Округин А.В. (2005) Значение типоморфизма хромшпинелидов для прогнозирования коренных источников россыпной платины восточной части Сибирской платформы. *Отечественная геология*, (5), 3-10.
- Русин А.И., Вализер П.М., Краснобаев А.А., Банева Н.Н., Медведева Е.В., Дубинина Е.В. (2012) Природа гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовых пород Ильменогорского комплекса (Ю.Урал). *Литосфера*, (1), 91-109.
- Русин А.И., Краснобаев А.А., Вализер П.М. (2006а) Геология Ильменских гор: ситуация, проблемы. *Геология и минералогия Ильменогорского комплекса*. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 3-19.
- Русин А.И., Краснобаев А.А., Русин И.А., Вализер П.М., Медведева Е.В. (2006б) Щелочно-ультраосновная ассоциация Ильменских-Вишневых гор. *Геохимия, петрология, минерагения и генезис щелочных пород*. Миасс: УрО РАН, 222-227.
- Русин А.И., Медведева Е.В., Вализер П.М., Банева Н.Н. (2010) Апогроспидитовая природа анортитовых амфиболитов Ильменогорской сдвиговой зоны (Юж. Урал). *Магматизм и метаморфизм в истории Земли. Т. II*. Екатеринбург: УрО РАН, 187-189.
- Штейнберг Д.С., Левин В.Я. (1971) Основные проблемы геологического строения, истории формирования и состава Ильменогорского комплекса метаморфических и магматических горных пород. *Тр. Ильменского государственного заповедника. Вып. IX*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 6-22.
- Bonatti E., Ottonello G., Hamlyn P.R. (1986) Peridotites from the island of Zabergad (St. Jong), Red Sea: petrology and geochemistry. *J. Geophys. Res.*, **91**, 599-631.
- Brey G.P., Kohler T. (1990) Geothermobarometry in four-phase lherzolites. New Thermobarometers and practical assessment of Existing Thermobarometers. *J. Petrol.*, **31**(6), 1353-1378.
- Dick J.B., Bullen T. (1984) Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 54-76.
- Fabries J. (1979) Spinel-olivine Geothermometry in peridotites from ultramafic complexes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **69**, 329-336.
- McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Obata M. (1980) The Ronda peridotite: garnet-, spinel-, and plagioclase-lherzolite facies and the P-T trajectories of a high-temperature mantle intrusion. *J. Petrol.*, **21**(3), 533-572.
- Perchuk L.L. (1990) Derivation of thermodynamically consistent system of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. *Progress in metamorphic and magmatic petrology*. Cambridge: Cambridge University Press, 93-112.
- Ravna E.J., Paquin J. (2003) Thermobarometric methodologies applicable to eclogites and garnet ultrabasicites. *EMU Notes in Mineralogy*, **5**(8), 229-259.
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb Geochronology by ion microprobe. Applications in microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Rev. Econ. Geol.*, (7), 1-35.

## REFERENCES



- Medvedeva E.V. (2011b) Zirconology of the Fenites of the Ilmeny Mountains. *Dokl. Akad. Nauk*, **440**(1), 100-104. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Valizer P.M., Rusin A.I., Busharina S.V., Medvedeva E.V. (2015) Tsirkonologiya giperbazitov Buldymyskogo massiva (Il'meno-Vishnevogorskii kompleks, Yuzhnyi Ural). *Dokl. Akad. Nauk*, **461**(1), 63-69. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Valizer P.M., Rusin A.I., Busharina S.V., Medvedeva E.V., Rodionov N.V. (2011b) Zirconology of amphibolites of the Selyankino strata of the Ilmeny Mountains (the Southern Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **441**(5), 661-665. (In Russian)
- Levin V.Ya. (1974) *Shchelochnaya provintsiya Il'menskikh-Vishnevyykh gor na Urale* [Alkaline Province of the Ilmeny-Vishnevy Mountains in the Urals]. Moscow, Nauka Publ., 223 p. (In Russian)
- Levin V.Ya., Ronenson B.M., Samkov V.S., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P. (1997) *Shchelochno-karbonatitovyye komplekсы Urala* [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Ekaterinburg: Uralgeolkom Publ., 274 p. (In Russian)
- McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Medvedeva E.V., Nemov A.B., Kotlyarov V.A. (2015). Metasomatites of basic and medium composition from the Nyashevo serpentinite massif (Ilmeny Mountains, the Southern Urals). *Litosfera*, (6), 53-68. (In Russian)
- Mishkin M.A. (1990) Amphibole geothermobarometer for metabasites. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **312**(4), 944-946. (In Russian)
- Nedosekova I.L., Belousova E.A., Belyatskii B.V. (2014). U-Pb age and Lu-Hf isotope systems of zircons of the Ilmeny-Vishnevogorsk alkaline-carbonatite complex, the Southern Urals. *Litosfera*, (5), 19-32. (In Russian)
- Obata M. (1980) The Ronda peridotite: garnet-, spinel-, and plagioclase-lherzolite facies and the *P-T* trajectories of a high-temperature mantle intrusion. *J. Petrol.*, **21**(3), 533-572.
- Okrugin A.V. (2005) The importance of the chromospinelids typomorphism for forecasting the indigenous sources of placer platinum in the eastern part of the Siberian Platform. *Otechestvennaya Geologiya*, (5), 3-10. (In Russian)
- Perchuk L.L. (1990) Derivation of thermodynamically consistent system of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. *Progress in metamorphic and magmatic petrology*. Cambridge: Cambridge University Press, 93-112.
- Ravna E.J., Paquin J. (2003) Thermobarometric methodologies applicable to eclogites and garnet ultrabasites. *EMU Notes in Mineralogy*, **5**(8), 229-259.
- Rusin A.I., Krasnobaev A.A., Rusin I.A., Valizer P.M., Medvedeva E.V. (2006b). Alkaline-ultrabasic association of Ilmeny-Vishnevy mountains. *Geokhimiya, petrologiya, mineragiya i genezis shchelochnykh porod*. [Geochemistry, petrology, mineralogy and genesis of alkaline rocks]. Miass: UrO RAN, 222-227. (In Russian)
- Rusin A.I., Krasnobaev A.A., Valizer P.M. (2006a) Geology of the Ilmeny mountains: situation, problems. *Geologiya i mineralogiya Il'menogorskogo kompleksa*. [Geology and mineralogy of the Ilmenogorsky complex]. Miass: IGZ UrO RAN, 3-19. (In Russian)
- Rusin A.I., Medvedeva E.V., Valizer P.M., Baneva N.N. (2010). Apogrospidite nature of anorthite amphibolites of the Ilmenogorsk shear zone (the Southern Urals). *Magmatizm i metamorfizm v istorii Zemli. T. II*. [Magmatism and metamorphism in the history of the Earth. V. II]. Ekaterinburg: UrO RAN, 187-189. (In Russian)
- Rusin A.I., Valizer P.M., Krasnobaev A.A., Baneva N.N., Medvedeva E.V., Dubinina E.V. (2012) Nature of garnet-anorthite-clinopyroxene-amphibole rocks of the Ilmenogorsky complex (the Southern Ural). *Litosfera*, (1), 91-109. (In Russian)
- Shteinberg D.S., Levin V.Ya (1971) The main problems of the geological structure, the history of the formation and composition of the Ilmenogorsk complex of metamorphic and magmatic rocks *Tr. Il'menskogo gosudarstvennogo zapovednika. V. IX*. Sverdlovsk, UNTs Akad. Nauk SSSR, 6-22. (In Russian)
- Varlakov A.S. (1995) *Riftogennyye ofiolity, metamorfizm giperbazitov i stroenie Vishnevogorskogo-Il'menogorskogo kompleksa* [Riftogenic ophiolites, metamorphism of hyperbasites and the structure of the Vishnevogorsky-Ilmenogorsky complex] Miass: IMin UrO RAN, 67 p. (In Russian)
- Varlakov A.S., Kuznetsov G.P., Corablev G.G., Murkin V.P. (1998) *Giperbazity Vishnevogorsko-Il'menogorskogo metamorficheskogo kompleksa (Yuzhnyi Ural)* [Hyperbasites of the Vishnevogorsk-Ilmenogorsky metamorphic complex (the South Urals)]. Miass: IMin UrO RAN, 195 p. (In Russian)
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb Geochronology by ion microprobe. Applications in microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Rev. Econ. Geol.*, (7), 1-35.