

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.47+551.243.4 (470.621)

DOI: [10.46698/VNC.2021.91.98.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.91.98.004)

Оригинальная статья

Минеральный состав серпентинитов Кишинского массива (Большой Кавказ)

Ю. В. Попов¹, О. Е. Пустовит², А. Ю. Никулин¹¹Южный федеральный университет, Россия, 344103,
г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40, e-mail: popov@sfnu.ru;²ООО «ГеоБазисПроект», Россия, 344018, г. Ростов-на-Дону,
ул. Текучева, д. 246, офис 39.

Статья поступила: 01.02.2021, доработана: 18.02.2021, одобрена в печать: 25.02.2021

Резюме: Актуальность работы. Ряд ключевых вопросов геологии серпентинитовых массивов Большого Кавказа остается дискуссионным. К их числу относятся формационная принадлежность и геодинамическая типизация протолита апогипербазитов. Необходимым фактическим материалом для обсуждения этих вопросов служат сведения о минеральном составе. Объектом исследований являются серпентиниты Кишинского массива, залегающего в основании Кизилкольского тектонического покрова в зоне Передового хребта Большого Кавказа. **Цель работы** – получение данных о минеральном составе серпентинитов Кишинского массива, анализ особенностей состава зональных хромшпинелидов, получение данных об условиях формирования и преобразования апогипербазитов. **Методы исследования.** Рентгенофазовый анализ, электронно-зондовый микроанализ и электронная микроскопия, статистический анализ результатов измерений. **Результаты работы.** Изучаемые серпентиниты интенсивно дислоцированы. В целом они имеют хризотил-антигоритовый состав. В составе «тектонических окатышей» внутренние части сложены антигоритовыми (с небольшим количеством хризотила) с бруситом разновидностями, внешние части – хризотил-антигоритовыми с клинохлором. По разломам отмечается гидротермальное оталькование, окварцевание и карбонатизация. В серпентинитах присутствуют зональные хромшпинелиды, ядерные части которых представлены алюмохромитом с реликтами хромпикотита, каймы – феррихромитом – хроммагнетитом; локально отмечаются тонкие оторочки магнетита. Метасоматические замещения в хромшпинелидах сопровождались привнесением Fe (замещавшего как двух-, так и трехвалентные катионы), Mn, Ni и выносом Mg, Al, Cr, V. Преобразования пород происходили в условиях высокотемпературной зоны зеленосланцевой фации с участием восстановительных флюидов при относительно пониженном отношении флюид/порода. Для ядер значения Cr# составляют ~0,5-0,7, Mg# ~0,4-0,6, что отвечает области составов первичных магматических шпинелей. Судя по составу хромшпинелидов, апогипербазиты связаны с офиолитовой ассоциацией и близки ультрамафитам островодужных обстановок, в том числе серпентинитовым диапирам фронтальных частей островных дуг. При сравнении с серпентинитами расположенного севернее Даховского выступа устанавливается формационное сходство – принадлежность к офиолитам, но в то же время проявляется отличие Р-Т параметров условий метаморфических трансформаций.

Ключевые слова: Кишинский массив, серпентинитовый меланж, серпентинит, хромшпинелиды, минеральный состав.

Для цитирования: Попов Ю. В., Пустовит О. Е., Никулин А. Ю. Минеральный состав серпентинитов Кишинского массива (Большой Кавказ). *Геология и Геофизика Юга России*. 2021. 11 (1): 38 – 51. DOI: 10.46698/VNC.2021.91.98.004.

DOI: [10.46698/VNC.2021.91.98.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.91.98.004)

Original paper

Mineral composition of serpentinites of the Kishinskij protrusion (Greater Caucasus)

Yu. V. Popov¹, O. E. Pustovit², A. Yu. Nikulin¹

¹Southern Federal University, 40 R. Zorge Str., Rostov-on-Don 344090,
Russian Federation, e-mail: popov@sfedu.ru;

²GeoBasisProect Ltd, 139 building B, office 7, Tekucheva Str.,
Rostov-on-Don 344018, Russian Federation

Received: 01.02.2021, revised: 18.02.2021, accepted: 25.02.2021

Abstract: Relevance. Several key issues in the geology of the serpentinite massifs of the Greater Caucasus remain debatable. These include formational and geodynamic typing the protolith of apohyperbasites. The necessary factual material for discussing these issues is information about the mineral composition. The object of research is the serpentinites of the Kishinsky massif, which lies at the base of the Kizilkol tectonic cover in the zone of the Peredovoy Range of the Greater Caucasus. **The aim** of this study was to gather data on serpentinites of Kishinsky massif mineral composition; characteristics analysis of the zonal composition of chromespinelides; to obtain data on the formation conditions and transformation of apohyperbasites. **Methods.** X-ray phase analysis, electron microprobe analysis and electron microscopy, statistical analysis of measured results. **Results.** The studied serpentinites are intensively dislocated. Generally, they are of chrysotile-antigorite composition. As part of the “tectonic pellets”, the inner parts are composed of antigorite (with a small amount of chrysotile) and brucite varieties, the outer parts are chrysotile – antigorite with clinocllore. Presence of hydrothermal talcose, silicification and carbonatization is noted in the observed faults. There are zonal chromespinelides in serpentinites where nuclear part is represented by chromohercynite with relics of chromepicotite; the edges – ferrochromium and chromemagnetite; locally observed thin rims of magnetite. Metasomatic substitutions in chromespinelides were accompanied by the addition of Fe (which replaced both di- and trivalent cations), Mn, Ni, and the removal of Mg, Al, Cr, and V. Rock transformations occurred in the high-temperature zone of the greenschist facies with reducing fluids at a relatively low fluid/rock ratio. The values of Cr# are ~0.5-0.7, Mg# ~0.4-0.6 for the cores which corresponds to the primary magmatic spinels composition area. Based on the composition of chromespinelides it is established the apohyperbasites are associated with the ophiolite's association and close to ultramafic rocks of island-arc environments, including serpentinite diapires in the front parts of island arcs. A formational similarity is established – belonging to ophiolites, but there is a difference – in the P-T parameters of the conditions of metamorphic transformations when compared with serpentinites located to the north of the Dakhovsky shield.

Keywords: Kishinsky massif, serpentinite melange, serpentinite, chromespinelides, chrome spinels, mineral composition.

For citation: Popov Yu. V., Pustovit O. E., Nikulin A. Yu. Mineral composition of serpentinites of the Kishinskij protrusion (Greater Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South* (In Russ.). 2021. 11 (1): 38 – 51. DOI: 10.46698/VNC.2021.91.98.004.

Введение

Апогипербазитовые массивы Большого Кавказа являются весьма сложным объектом исследования в силу утраты первичного минерального состава, залегания в форме тектонических пластин и слабой охарактеризованности результатами

прецизионных аналитических исследований. До настоящего времени нет единого мнения об их возрасте, формационной и геодинамической принадлежности. Взгляды на эти вопросы менялись в зависимости от господствовавших представлений о тектонической эволюции складчатой области. При геологическом картировании в 1950-70 гг. серпентиниты рассматривались как производные перидотитовой магмы

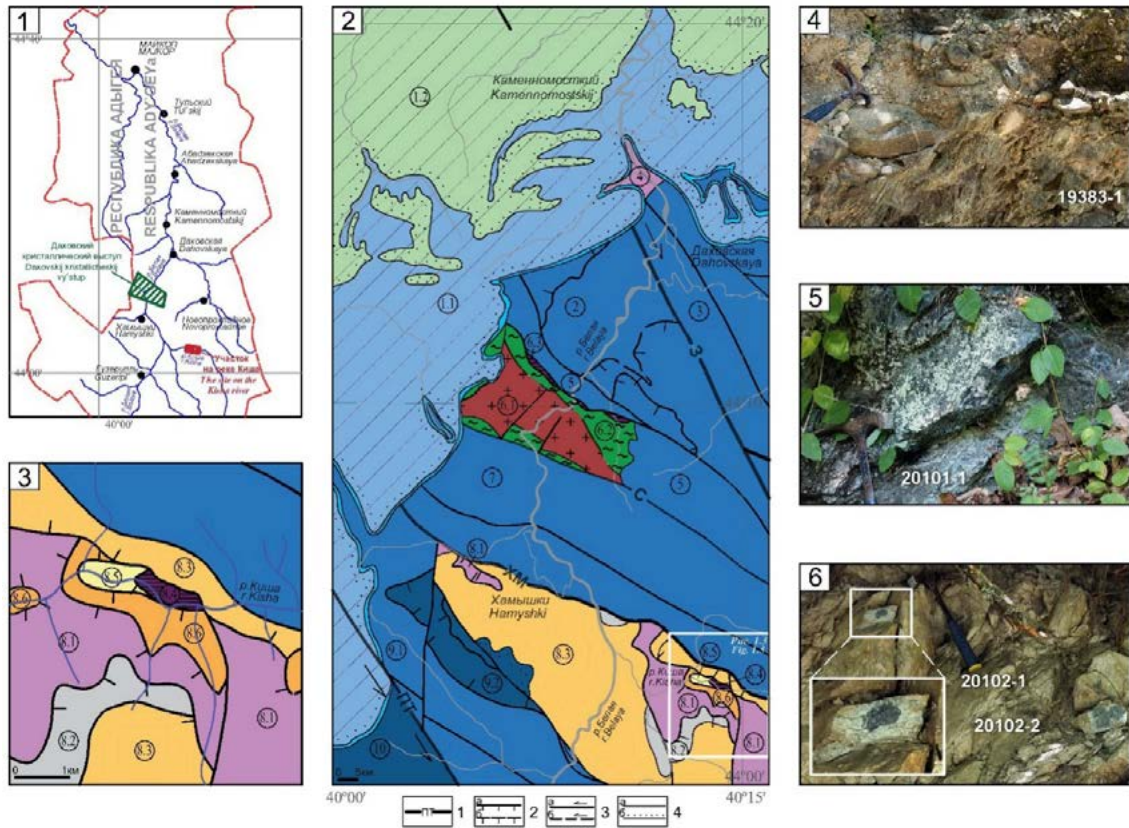


Рис. 1. Положение и геологическое строение территории: 1 – положение территории, 2 – геологическое строение западного окончания зоны Передового хребта; 3 – схема тектонического строения района Кишинского массива; 4 – контакт серпентинитов и пород Кизилкольского тектонического покрова; 5 – рассланцованные серпентиниты; 6 – «тектонические окатыши» серпентинитов (прирусловая часть р. Киша); указаны места отбора образцов для рентгенофазового анализа. Условные обозначения.: 1 – главные разрывные нарушения (ПТ – Пшекиш-Тырныаузский, ХМ – Хамышкинский, 3 – Заканский, С – Северный разломы); 2 – надвиги: а – достоверные, б – предполагаемые; 3 – сдвиги: а – достоверные, б – предполагаемые; 4 – границы структур: а – согласные, б – несогласные. **Геологические структуры, обозначенные на схеме:** 1 – Северо-Кавказская моноклираль: 1.1 – область развития келловей – верхнеюрских пород, 1.2 – область развития меловых пород; 2-7 – Лабино-Малкинская зона прерывистой складчатости: 2 – Догуакская покровно-складчатая зона (J_{1-2}), 3 – Сахрайская зона сдвигово-надвиговых дислокаций (J_{1-2}), 4 – Руфабгинский выступ (гранитоидный массив, PZ_{2-3} ; осадочный комплекс, Т); 5 – Даховская антиклиналь; 6 – Даховский выступ: 6.1 – гранитоидный массив (PZ_{2-3}), 6.2 – метаморфический балканский комплекс ($PR_2?$), 6.3 – серпентиниты апогипербазитовые ($PR_2?$); 7 – Дудугушская синклиналь; 8-9 – Пшекиш-Тырныаузская шовная зона: 8 – Пшекиш-Бамбакский блок: 8.1 – Ацгаринский тектонический покров (ацгаринский метаморфический комплекс, $PR_2?$), 8.2 – Кишинский параавтохтон, сероцветная моласса (C_3); 8.3 – Кишинский параавтохтон, красноцветная моласса (P_{1-2}); 8.4 – серпентиниты апогипербазитовые ($PR_2?$); 8.5 – метаморфический армовский комплекс ($PR_2?$); 8.6 – Кизилкольский тектонический покров (вулканогенно-осадочный комплекс (D_{2-3})); 9 – Архыз-Гузерильская депрессия: 9.1 – Гузерильская синклиналь (J_{1-2}), 9.2 – тектонический покров (J_1); 10 – складчато-глыбовое понятие Главного хребта, Псеаихинская депрессия (J_{1-2}) /

*Fig. 1. The location and geological structure of the territory: 1 – the position of the territory; 2 – geological structure of the western end of the Peredovoy Ridge zone; 3 – diagram of the tectonic structure of the Kishinskij protrusion region; 4 – contact of serpentinites and rocks of the Kizilkol tectonic cover; 5 – tectonically fractured serpentinites; 6 – fault breccia of serpentinites (the riverbed part of the river Kisha); the locations of sampling for X-ray phase analysis are indicated. Legend: 1- main faults (ПТ – Pschekish-Tyrnyauz, ХМ – Khamishninskiy, З – Zakanskiy, С – North faults); 2 – thrust-faults: а – veracious ones; б – estimated ones; 3 – strike-slip faults: а – veracious ones; б – estimated ones; 4 – structure boundaries: а – concordant; б – discordant. **Geological structures:** 1 – North Caucasian monocline: 1.1 – Callovian-Upper Jurassic rock development area; 1.2 – Cretaceous rock development area; 2-7 – Labino-Malkinsky intermittent folding zone: 2 – Doguakskaya integumentary folding zone; 3 – Sakhrayskaya shear-thrust dislocation zone; 4 – Rufabginskiy ledge (granitoid diastrophic block, PZ₂₋₃, sedimentary complex, T); 5 – Dakhovskaya anticline; 6 – Dakhovskiy ledge: 6.1 – granitoid diastrophic block (PZ₂₋₃); 6.2 – metamorphic series of Balkan complex (PR₂?), 6.3 – apogiperbasite serpentines (PR₂?); 7 – Dudugush syncline; 8-9 – Pschekish-Tyrnyauz suture area: 8 – Pschekish-Bambakskiy block: 8.1 – Azgara cover, 8.2 – Kishinskiy paraautochthone cover, gray molasses (C₃); 8.3 – Kishinskiy paraautochthone cover, red molasses (P₁₋₂); 8.4 – apogiperbasite serpentines (PR₂?); 9 – Arhyz-Guzeripl depression: 9.1 – Guzeriplsincline (J₁₋₂), 9.2 – tectonic cover (J₁); 10 – the folded-block elevation of the Main Ridge, Pseashikhinsk depression (J₁₋₂)*

и относились к продуктам среднепалеозойского магматизма [Михеев, Потапенко, 1973], либо в их составе выделялись ранне- и среднепалеозойские образования [Геология СССР..., 1968]. С развитием мобилистических представлений они стали рассматриваться как фрагменты тектонических меланжей и часть офиолитовой ассоциации [Баранов и др., 1980]. Данные К-Аг датирования [Лебедько, 1980] (весьма неоднозначные и нередко противоречащие полученным впоследствии более надежными методами данным [Somin et al., 2007]) «удревнили» возраст до позднего протерозоя, при этом все выходы были отнесены к единому беденскому комплексу, что нашло отражение на геологических картах 2000-х годов издания [Государственная геологическая карта..., 2004].

Выходы serpentinitов связаны преимущественно с тектонической зоной Передового хребта, где они локализованы в форме линз в зонах крупных разломов герцинского кристалликума, рассматриваемого как основание доверхнепалеозойского грабен-синклинория, либо образуют тектонические пластины разного размера, перекрытые верхнепалеозойскими или юрскими толщами.

Один из представительных выходов расположен в долине р. Киша в ~6,5 км от устья, где пластина serpentinitов залегает на границе блока кристалликума, сложенного метаморфическим армовским комплексом (PR₂), сложенным слюдяными гнейсами и сланцами, и Кизилкольского тектонического покрова, образованного девонским вулканогенно-осадочным комплексом (D₂₋₃) (рис. 1). Serpentinitы разлинованы (рис. 1.5) превращены в тектонические брекчии («тектонические окашши»), внутренние части которых сложены темно-серыми, внешние – зеленовато-серыми serpentinitами (рис. 1.6); по разломам наблюдается развитие кварц-карбонатных прожилков.

Методы исследований

Изучение микростроения и минерального состава serpentinitов выполнено методами электронно-зондовых исследований и рентгенофазового анализа. Электронно-зондовые исследования проведены на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU, оснащенной системами энергодисперсионного микро-

анализа INCA ENERGY 450/XT и волнодисперсионного анализа INCA Wave 700 при ускоряющем напряжении 20 kV с использованием стандартов «Micro-Analysis Consultants Ltd.». Измерения выполнены с учетом методических рекомендаций, изложенных в работе [Reed, 2005]. Для хромшпинелидов проведен количественный анализ в точках и элементное картирование с целью выявления зональности.

Рентгенофазовый анализ выполнен на отражение с фокусировкой по Бреггу-Брентано на дифрактометре «ARLX'TRA», использующем кинематическую схему Θ - Θ с горизонтальным расположением плоского образца. Использовано характеристическое излучение медного анода (длины волн $\text{CuK}\alpha_1$ 1,5406 Å, $\text{CuK}\alpha_2$ 1,5444 Å). Фазовый анализ выполнен с помощью базы порошковых дифракционных данных PDF-2, выпуск 2006.

Расчет Fe^{3+} выполнен исходя из стехиометрических соображений согласно [Droop, 1987]. Учитывая малый объем выборки и отличия распределений величин от нормального, статистическая обработка результатов элементного анализа проведена методами непараметрической статистики.

Результаты

Кишинские серпентиниты сильно катаклазированы, имеют спутанноволокнистую или пластинчатую микроструктуру (рис. 3-1, 2). В целом имеют хризотил-антигоритовый состав. По данным рентгенофазового анализа внутренние области «тектонических окатышей» представлены антигоритовой с бруситом ассоциацией; внешние – хризотил-антигоритовой с хлоритом, близким к клинохлору (рис. 2); такой состав типичен для основной массы пород. По разломам развивается гидротермальное оталькование, окварцевание и карбонизация (рис. 3-3); наиболее масштабные эти процессы развиты вблизи тектонического контакта.

В составе серпентинитов присутствуют хромшпинелиды, обычно зональные. Характер зональности (рис. 3) отражает присутствие обогащенных алюминием

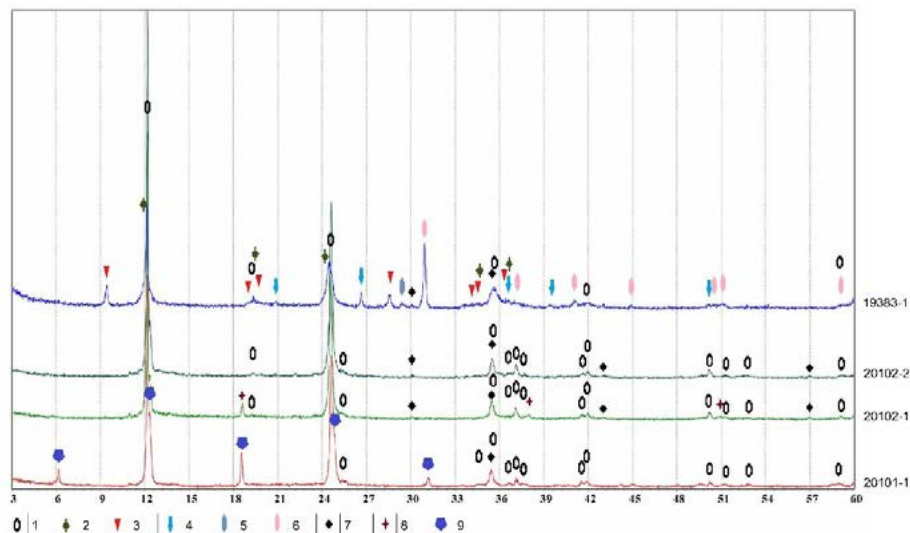


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа. Положение образцов указано на рис. 1.4-1.6.

Указаны рефлексы фаз: 1 – антигорит; 2 – хризотил; 3 – тальк; 4 – кварц; 5 – кальцит; 6 – доломит; 7 – магнетит; 8 – брусит; 9 – клинохлор /

Fig. 2. Results of X-ray phase analysis. The position of the samples is shown in Fig. 1.4-1.6. Reflexes of phases are indicated: 1 – antigorite; 2 – chrysotile; 3 – talc; 4 – quartz; 5 – calcite; 6 – dolomite; 7 – magnetite; 8 – brucite; 9 – clinochlore

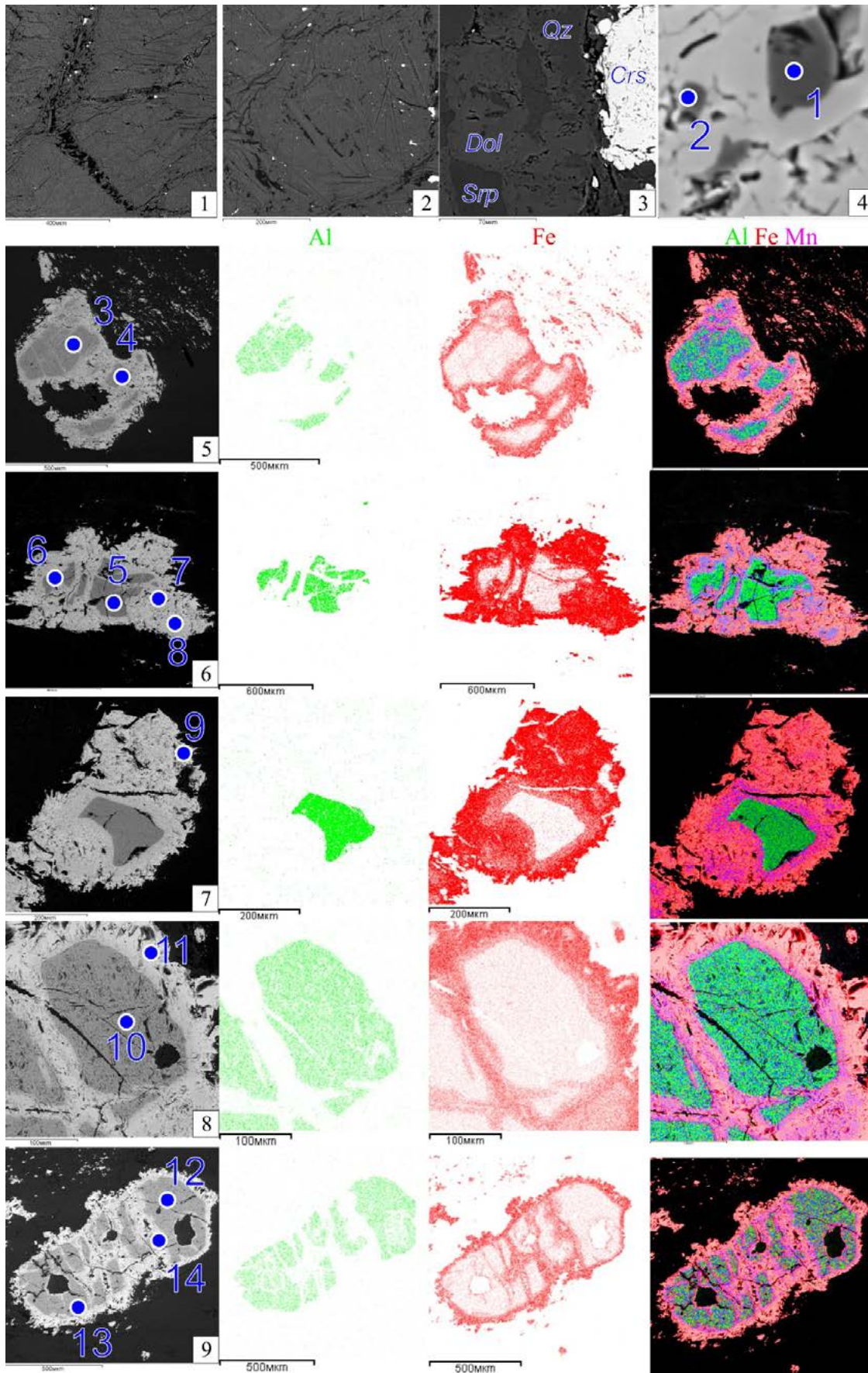


Рис. 3. Структура серпентинитов и хромитинелидов:

1, 2 – типичное строение серпентинита, 3 – развитие карбонатов и кварца в серпентините, 4 – микрозерна хромпикотита, 5-9 – рентгеновские карты распределения алюминия, железа и марганца (излучение $K\alpha_1$). Изображение BE. Указаны места проведения микроанализа.

Обозначения минералов: Dol – доломит, Qz – кварц, Srp – серпентин /

Fig. 3. Structure of serpentinites and chrome spinels: 1, 2 – typical texture of serpentinite, 3 – development of carbonates and quartz in serpentinite, 4 – micrograin of chromepicotite, 5-9 – X-ray distribution maps of aluminum, iron, and manganese ($K\alpha_1$ radiation). Image of BE. The locations of the microanalysis are indicated. Mineral designations: Dol – dolomite, Qz – quartz, Srp – serpentine

участков ядер и прогрессирующее обогащение железом. Каймы образованы феррихромитом – хроммагнетитом, ядра – алюмохромитом (рис. 3; табл. 1) с реликтами хромпикотита (рис. 3-4; в табл. 1 анализы 1-2); редко отмечаются тонкие оторочки магнетита и его отдельные зёрна. Во внутренних частях некоторых шпинелей наблюдаются пористые ядра с реликтовыми обогащенными Al_2O_3 и MgO островками (известные как «атолловые структуры»); состав таких шпинелей отличается присутствием SiO_2 , видимо, связанного с тончайшими кристалликами хлорита, серпентина и прочих силикатных микрофаз (рис. 3-6). Статистический анализ результатов измерения состава ядер отражает метасоматические замещения, главным образом, вызванные привнесением железа, никеля, марганца и выносом магния, алюминия, хрома и ванадия, проявленные в результатах корреляционного анализа (табл. 2) и нагрузке I фактора в результатах факторного анализа, выполненного методом главных компонент (рис. 4). Второй фактор отражает перераспределение малых элементов (рис. 4) – привнос никеля (поступающего совместно с железом) и локальное концентрирование в ядрах цинка, ванадия и марганца; в алюмохромитах – хромпикотитах содержание MnO составляет до ~2 мас.%, ZnO до ~1 мас.%

Таблица 1 / Table 1

Состав хромшпинелидов из серпентинитов Кишинского массива (в мас.%). Места проведения микроанализов указаны на рисунке 3 / The composition of chrome spinels from serpentinites of the Kishinskij protrusion (in wt.%). The microanalysis sites are indicated in Fig. 3

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	CoO	NiO	ZnO	Итого	Cr#	Mg#
1	13,86	27,50	-	0,10	0,18	38,30	0,78	18,21	0,26	0,21	-	99,40	0,48	0,64
2	12,76	26,80	-	0,04	0,24	37,09	0,89	21,37	0,27	0,15	0,20	99,81	0,48	0,59
3	7,93	14,54	-	0,07	0,28	51,42	1,74	21,78	0,27	0,04	0,81	98,88	0,70	0,42
4	10,65	15,69	1,88	0,06	0,29	47,51	1,79	19,97	0,32	-	0,65	98,81	0,67	0,51
5	13,21	20,49	1,53	0,08	0,20	43,82	0,82	18,51	0,24	0,03	0,57	99,50	0,59	0,60
6	12,69	20,99	1,43	0,01	0,23	42,47	0,87	19,32	0,37	0,04	1,33	99,75	0,58	0,59
7	5,28	0,17	1,06	0,07	0,16	30,79	1,08	59,81	0,36	0,68	0,46	99,92	0,99	0,28
8	5,11	0,18	1,22	0,13	0,13	32,98	1,17	57,58	0,52	0,31	0,41	99,74	0,99	0,27
9	2,40	0,09	-	0,03	0,05	9,97	0,76	84,33	0,63	0,93	0,22	99,41	0,99	0,13
10	8,42	16,93	-	0,11	0,18	49,18	1,59	21,82	0,19	0,02	1,13	99,57	0,66	0,44
11	1,31	0,22	-	0,31	0,06	14,19	1,11	80,78	0,37	0,58	0,42	99,35	0,98	0,07
12	8,31	14,02	-	0,02	0,34	53,96	0,79	21,26	0,32	0,16	0,32	99,50	0,72	0,43
13	8,82	14,14	-	0,03	0,34	52,85	1,08	20,98	0,19	0,09	0,37	98,89	0,71	0,45
14	2,55	0,23	-	0,08	0,19	24,16	1,98	68,93	0,56	0,60	0,40	99,68	0,99	0,15

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты корреляции элементов в ядрах хромшпинелидов – значения ранговых корреляций Спирмена; отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05$ (N = 36) / The correlation coefficients of elements in the cores of chrome spinels are meanings of Spearman’s rank correlations; marked correlations are significant at the level $p < 0.05$

	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₅	MnO	FeO	CoO	NiO	ZnO
MgO	1,00	0,89	0,01	0,38	0,79	-0,52	-0,91	-0,17	-0,70	-0,01
Al ₂ O ₃	0,89	1,00	0,00	0,42	0,81	-0,44	-0,91	-0,20	-0,75	0,10
TiO ₂	0,01	0,00	1,00	-0,09	-0,01	0,18	0,14	-0,28	0,13	-0,22
V ₂ O ₅	0,38	0,42	-0,09	1,00	0,66	-0,06	-0,41	0,01	-0,57	0,56
Cr ₂ O ₅	0,79	0,81	-0,01	0,66	1,00	-0,33	-0,83	-0,04	-0,82	0,22
MnO	-0,52	-0,44	0,18	-0,06	-0,33	1,00	0,49	0,35	0,35	0,32
FeO	-0,91	-0,91	0,14	-0,41	-0,83	0,49	1,00	0,12	0,76	0,02
CoO	-0,17	-0,20	-0,28	0,01	-0,04	0,35	0,12	1,00	0,21	-0,04
NiO	-0,70	-0,75	0,13	-0,57	-0,82	0,35	0,76	0,21	1,00	-0,23
ZnO	-0,01	0,10	-0,22	0,56	0,22	0,32	0,02	-0,04	-0,23	1,00

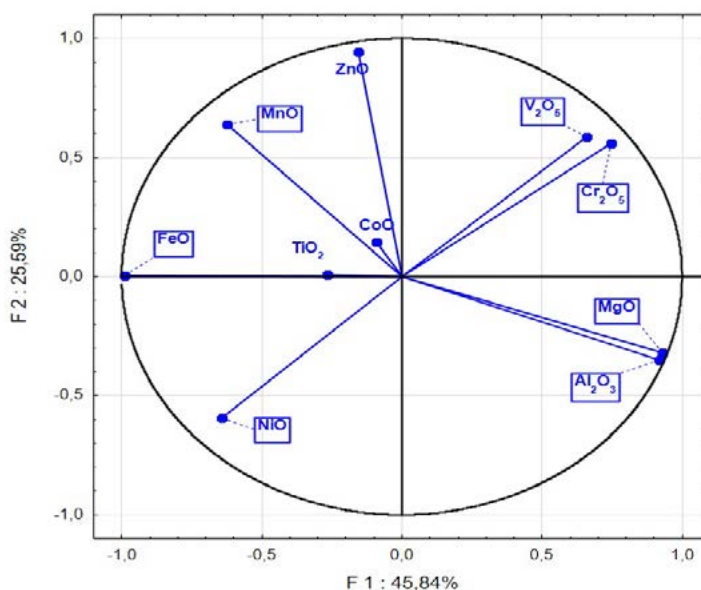


Рис. 4. Результаты обработки данных микроанализа хромшпинелидов методом главных компонент (проекция переменных на факторную плоскость; использованы первый и второй факторы – F1 и F2) /

Fig. 4. Results of statistical processing the data of microanalysis of chrome spinels by the principal component method (projection of variables onto the factor plane; the first and second factors – F1 and F2)

Для ядер значения Cr# составляют ~0,5-0,7, Mg# ~0,4-0,6, что отвечает области составов первичных магматических шпинелей [Merlini et al., 2009; Grieco, Merlini, 2012].

Обсуждение результатов

Полученные данные позволяют провести сопоставление с другими серпентинитами района, определить условия метаморфической трансформации пород и формирования реликтовых участков хромшпинелидов.

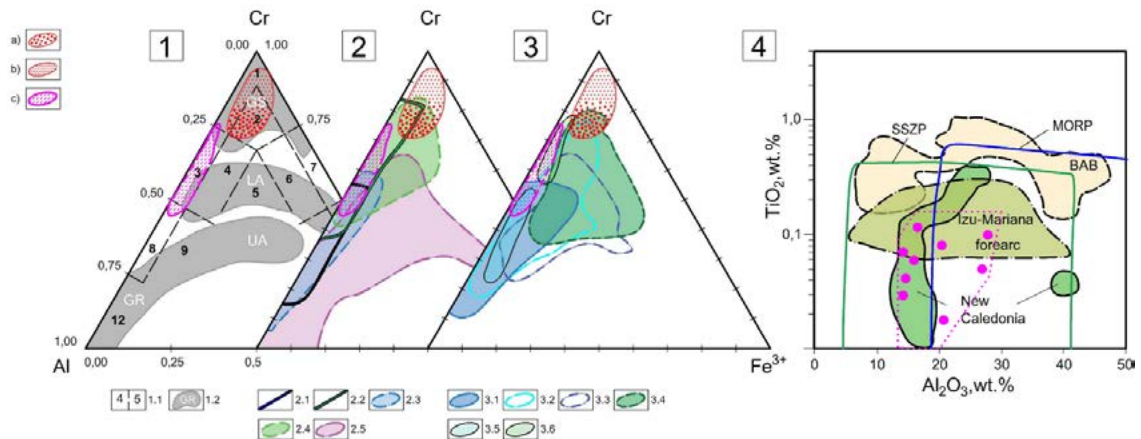


Рис. 5. Положение составов хромшпинелидов (внутренние области) на диаграммах $Al - Cr - Fe^{3+}$: 1.1 – поля составов на классификационной диаграмме (в соответствии с номенклатурой, разработанной Н.В. Павловым: 1 – хромиты, 2 – субферрихромиты, 3 – алюмохромиты, 4 – субферриалюмохромиты, 5 – ферриалюмохромиты, 6 – субалюмоферрихромиты, 7 – феррихромиты, 8 – хромпикотиты, 9 – субферрихромпикотиты); стадии метаморфизма: GS – зеленосланцевая, LA – низкотемпературная амфиболитовая, UA – высокотемпературная амфиболитовая, GR – гранулитовая (по [Saumur, Hattori, 2012; Hodel et al., 2017]); 2-3 – составы хромшпинелидов из пород разных геодинамических обстановок (по [Barnes, Roeder, 2001; Dick, Bullen, 1984; Ghazi et al., 2011; Zaeimnia et al., 2017; Kamenetsky et al., 2001] и др.): 2.1 – перидотиты островных дуг, 2.2 – абиссальные перидотиты, 2.3 – ультрамафиты COX, 2.4 – ультрамафиты глубоководных желобов, 2.5 – ксенолиты ультрамафитов из базальтов, 3.1 – абиссальные перидотиты, 3.2 – океаническое дно, 3.3 – океанические острова, 3.4 – островные дуги; 3.5 – ультрамафитовые массивы срединных хребтов Атлантического и Индийского океанов, 3.6 – конические подводные горы (серпентинитовые диапирсы) фронтальных частей Марианской и Идзу-Бонинской островных дуг, 4-состав ядер (d) и внешних зон (e) кишинских хромшпинелидов на диаграмме $Al_2O_3 - TiO_2$. Условные обозначения: 1 – составы внутренних частей хромшпинелидов серпентинитов Даховского поднятия (субферрихромиты), 2 – измененные части зерен хромшпинелидов Даховского поднятия, 3-ядра хромшпинелидов Кишинского массива /

Fig. 5. The position of the compositions of chrome spinels (internal parts) on the diagrams $Al - Cr - Fe^{3+}$: 1.1 – fields of compositions in the classification diagram (in accordance with the nomenclature developed by N. In. Pavlov: 1 – chromites, 2 – subferrichromites, 3 – alumochromite, 4 – subferrialumochromite, 5 – ferrialumochromite, 6 – subalumoferrichromite, 7 – ferrichromite, 8 – chromepicotite, 9 – subferrichromepicotite); 1.2 – metamorphic grade: GS – green, LA – low-temperature amphibolite, UA – high temperature amphibolite, GR – granulite (at [Saumur, Hattori, 2012; Hodel et al., 2017]); 2-3 – the compositions of chrome spinels from rocks of different geodynamic settings (for [Barnes, Roeder, 2001; Dick, Bullen, 1984; Ghazi et al., 2011; Zaeimnia et al., 2017; Kamenetsky et al., 2001] et al.): 2.1 – forearc peridotites, 2.2 – abyssal peridotites, 2.3 – ultramafites of MOR, 2.4 – ultramafites deepwater trenches, 2.5 – xenoliths of ultramafites from basalts, 3.1 – abyssal peridotites, 3.2 – ocean bottom, 3.3 – oceanic islands, 3.4 – island arcs; 3.5 – ultramafic massifs of the median ridges of the Atlantic and Indian oceans, 3.6 – conical seamounts (serpentinite diapirs) of frontal parts of the Mariana and Izu-Buninskoy island arcs; 4 – composition of cores (d) and outer zones (e) of chrome spinels of the Kishinskij protrusion on the diagrams $Al_2O_3 - TiO_2$. Legend: 1 – the compositions of the inner parts of chrome spinels of serpentinite Dakhov Uplift (subferrichromites), 2 – modified parts of the grains of chrome spinels of serpentinite Dakhov Uplift, 3-core of chrome spinels of Kishinskij protrusion

Ближайшие выходы серпентинитов расположены севернее на фланге Даховского кристаллического выступа (рис. 1.1), где образуют серию маломощных тектонических пластин, прорванных позднегерцинскими гранитами. Для них типичны лизардит-хризотилитовые ассоциации с пылевидным магнетитом (связанным с β -лизардитом) и хромшпинелидами, внутренние части ядер которых соответствуют субферрихромитам (с $Cr\# \sim 0,8$, $Mg\# \sim 0,3-0,4$), периферические – хромитам, а внеш-

ние каемки – магнетитам (с содержанием Cr_2O_3 до ~4 мас.%) [Попов и др., 2019, 2020]. Кишинские серпентиниты несут признаки трансформаций в более высокотемпературных условиях, на что указывает как антигоритовый состав (антигорит относительно лизардита и хризотила стабилизируется с повышением температуры и давления на твердые фазы и в условиях пониженного парциального давления воды вследствие восстановленности флюидов [Маракушев, Бобров, 2005]), так и составы хромшпинелидов (рис. 5.1), в том числе значение Mg\# (для зеленосланцевой фации оно составляет 0,4-0,7, для амфиболитовой <0,35 [Gervilla et al., 2012]). Наличие хорошо оформленных феррихромитовых каемок вокруг богатых алюминием ядер является следствием длительного прогрева пород после процесса серпентинизации [Karisiotis, 2014], а интенсивное замещение железом как трех-, так и двухвалентных катионов – восстановительных условий во флюидной системе. При этом наличие реликтовых хромпикотитовых участков объясняется условиями, при которых $P_{\text{H}_2\text{O}} < P_{\text{общ.}}$ [Candia, Gaspar, 1997], образование хроммагнетита, а не хромита, – пониженным отношением флюид/порода [Gervilla et al., 2012]. Последующее брекчирование пород (видимо, сопровождавшее эксгумацию и формирование герцинских тектонических надвигов), происходило в условиях снижения температуры, интенсивной циркуляции растворов, смены условий на более окислительные, что отразилось в образовании хризотил-антигоритовых с хлоритом внешних зон «тектонических окатышей» и в формировании тонких наружных оторочек хроммагнетитового состава, а при более поздних хрупких деформациях – в отальковании, кварц-карбонатом прожилковании, развитии магнетита.

Составы ядер кишинских хромшпинелидов соответствуют составам, свойственным офиолитам, и, в частности, ультрамафитам островных дуг (рис. 5.2) и конических подводных гор (серпентинитовых диапиров) фронтальных частей Марианской и Идзу-Бонинской островных дуг (рис. 5.3, 5.4). Такая реконструкция соответствует в ранее полученным данным для хромшпинелидов фланга Даховского выступа [Попов и др., 2020].

Выводы

Образующие тектонические покровы в западной части зоны Передового хребта серпентиниты, судя по составу хромшпинелидов – единственных на данный момент установленных минеральных индикаторов геодинамической приуроченности развитых здесь нацело серпентинизированных комплексов – являются фрагментами офиолитовой ассоциации, относимой к типу офиолитов супра- или надсубдукционных зон (SSZ), ассоциирующих с островодужными комплексами [Pearce et al., 1984]. Обдукция апогипербазитов и формирование меланжевых комплексов происходили в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма, но при вариации в тектонической зоне Передового хребта P-T параметров и характера флюидных систем. Для серпентинитов фланга Даховского выступа устанавливается образование в низкотемпературных условиях (с сохранением текстур замещения первичных оливинов лизардитом) при повышенном отношении флюид/порода, связанным с влиянием гранитоидных магматических очагов [Попов и др., 2020]. Для серпентинитов Кишинского массива, залегающего в ассоциации с герцинским Кизилкольским тектоническим покровом, устанавливаются относительно повышенные P-T условия и пониженное отношение флюид/порода (с участием восстановленных флюидов). Фиксируемый в обоих рассматриваемых массивах диффузионный вы-

нос Al и Mg и хромшпинелидов и образование хлорита в их оторочках соответствует известной реакции $(Mg, Fe) (Al, Cr)_2O_4 + \text{флюид} \rightarrow Mg_5AlSi_3O_{10} (OH)_8 + (Fe, Mg) (Cr, Al)_2O_4$ [Kimball, 1990], в условиях зеленосланцевой фации реализуемой только при совместной серпентинизации оливина и пироксена [Bach et al., 2006]. Данное заключение соответствует полученному на основании анализа петрохимических данных и реликтовых структурных особенностей выводу о перидотитовом составе протолита [Соболев, 1952].

Таким образом, серпентиниты Кишинского массива принадлежат, наряду с другими выходами апогипербазитов Передового хребта, к офиолитовой ассоциации, связанной с островодужной обстановкой. Антигоритовые серпентиниты массива образовались в относительно повышенных P-T условиях и претерпели дифференциацию при формировании тектонических меланжей.

Литература

1. Баранов Г.И., Греков И.И., Нетреба А.В. Палеозойский магматизм Большого Кавказа в свете тектоники плит. // Тез. докл. V конференции по геологии и полезным ископаемым Северного Кавказа. – Ессентуки. 1980. – С. 84-86.
2. Геология СССР. Т. IX. Северный Кавказ. / Гл. ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1968. – 760 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Кавказская. Лист L – 37 – XXXV. – Майкоп. Объяснительная записка. – 2004.
4. Лебедько Г.И. Фундамент Северного Кавказа. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1980. – 123 с.
5. Маракушев А.А., Бобров А.В. Метаморфическая петрология: учебник. – М.: Наука, 2005. – 256 с.
6. Михеев Г.А., Потапенко Ю.Я. О возрасте альпинотипных гипербазитов Северного Кавказа. // Советская геология. – 1973. – № 1. – С. 131-137.
7. Попов Ю.В., Жабин А.В., Пустовит О.Е. Минеральный состав серпентинитов тектонического меланжа Даховского кристаллического выступа (Большой Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 4. – С. 38-48. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44487.
8. Попов Ю.В., Пустовит О.Е., Терещенко В.А. Акцессорные хромшпинелиды серпентинитов тектонического меланжа Даховского поднятия (Большой Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. – С. 38-55. DOI: 10.46698/VNC.2020.21.55.003
9. Соболев Н.Д. Ультрабазиты Большого Кавказа. – М.: Госгеолиздат, 1952. – 240 с.
10. Bach W., Paulick H., Garrido C.J., Ildefonse B., Meurer W., Humphris S.E. Unravelling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274). // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 25. – pp. 1467-1470.
11. Barnes S.J. Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. // J. Petrol. – 2001. – Vol. 42. – pp. 2279-2302.
12. Candia M.A. F., Gaspar J.C. Chromianspinels in metamorphosed ultramafic rocks from Mangabal I and II complexes, Goiás, Brazil. // Mineral. Petrol. – 1997. Vol. 60. – pp. 27-40.
13. Dick H.J. B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1984. – Vol. 86 (1). – pp. 54-76. DOI: 10.1007/BF00373711
14. Droop G.T. R. A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. // Mineralogical Magazine. – 1987. – Vol. 51 (3). – pp. 431-435.
15. Gervilla F., Padrón-Navarta J.A., Kerestedjian T., Sergeeva I., González-Jiménez J.M., Fanlo I. Formation of ferrian chromite in podiform chromitites from the Golyamo-Kamenyane

serpentinite, Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: A two-stage process. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2012. – Vol. 164 (4). – pp. 643-657.

16. Ghazi J.M., Moazzen M., Rahghoshay M., Moghadam H.S. The geodynamic setting of the Nain ophiolites, Central Iran: evidence from chromianspinels in the chromitites and associated rocks. *Ofioliti*. – 2011. – Vol. 36. No. 1. – pp. 59-76.

17. Grieco G., Merlini A. Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite. // *Int. J. Earth Sci.* – 2012. – Vol. 101. – pp. 1523-1533.

18. Hodel F., Macouin M., Triantafyllou A., Carlut J., Berger J., Rousse S., Ennih N., Trindade R. I. F. Unusual massive magnetite veins and highly altered Cr-spinels as relics of a Cl-rich acidic hydrothermal event in Neoproterozoic serpentinites (BouAzzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco). // *Precambrian Research*. – 2017. – Vol. 300. – pp. 151-167.

19. Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: An empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. // *Journal of Petrology*. – 2001. – Vol. 42 (4). – pp. 655-671.

20. Kapsiotis A. Composition and alteration of cr-spinels from milia and pefkiserpentinitized mantle peridotites (pindos ophiolite complex, greece). // *Geologica Carpathica*. – 2014. – Vol. 65 (1). – pp. 83-95. DOI: 10.2478/geoca-2013-0006

21. Kimball K.L. Effects of hydrothermal alteration on the compositions of chromianspinels. // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1990. – Vol. 105. – pp. 337-346.

22. Merlini A., Grieco G., Diella V. Ferritchromite and chromianchlorite formation in mélange-hosted Kalkanchromitite (Southern Urals, Russia). // *Am. Mineral.* – 2009. – Vol. 94. – pp. 1459-1467.

23. Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. / Kokelaar B.P., and Howells M.F., eds., *Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins: Geological Society of London Special Publication*. – 1984. – Vol. 16. – pp. 77-94.

24. Reed S.J. B. *Electron Microbe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. // Cambridge University Press. – 2005. – 232 p.

25. Saumur B.M., Hattori K. Zoned Cr-spinel and ferritchromite alteration in forearc mantle serpentinites of the Rio San Juan Complex, Dominican Republic. // *Mineralogical Magazine*. – 2012. – Vol. 77 (1). – pp. 117-136. DOI: 10.1180/minmag.2013.077.1.11

26. Somin M.L., Levchenkov O.A., Kotov A.B., Makeev A.F., Komarov A.N., Ro N.I., Lavrishchev V.A., Lebedev V.A. The Paleozoic age of high-pressure metamorphic rocks in the Dakhov Salient, northwestern Caucasus: Results of U-Pb geochronological investigations. // *Reports Earth Sciences*. – 2007. – T. 416. No. 1. – pp. 1018-1021.

27. Zaeimnia F., Kananian A., Arai S., Mirmohammadi M., Imamaliipour A., Khedr M.Z., Miura M., Abbou-Kebir K. Mineral chemistry and petrogenesis of chromitites from the Khoy ophiolite complex, Northwestern Iran: Implications for aggregation of two ophiolites. // *Island Arc*. – 2017. – Vol. 26 (6). – №e12211. DOI: 10.1111/iar.12211

References

1. Baranov G.I., Grekov I.I., Ntreba A.V. Paleozoic magmatism of the Greater Caucasus in the light of plate tectonics. Tez. report V conference on geology and mineral resources of the North Caucasus. Essentuki. 1980. pp. 84-86. (In Russ.)

2. Geologiya SSSR (Geology of the USSR). Volume IX. Severniy Kavkaz (North Caucasus). Geologicheskoye opisaniye (Geological description). Ed. A. V. Sidorenko. Moscow. Nedra (Publ.), 1968. 760 p. (In Russ.)

3. The state geological map of the Russian Federation on a scale of 1: 200000. Second edition. Caucasian series. Sheet L – 37, XXXV. Maykop. Explanatory note, 2004. (In Russ.)

4. Lebedko G.I. The foundation of the North Caucasus. Rostov-on-Don. RSU, 1980. 123 p. (In Russ.)

5. Marakushev A.A., Beavers A.V. *Metamorphic petrology: textbook*. Moscow. Science, 2005. 256 p. (In Russ.)
6. Mikheev G.A., Potapenko Yu.Ya. On the age of alpine-type hyperbasites of the North Caucasus. *Soviet Geology*. 1973. No. 1. pp. 131-137. (In Russ.)
7. Popov Yu.V., Zhabin A.V., Pustovit O.E. Mineral composition of serpentinites of the tectonic melange of the Dakhovsky crystalline protrusion (Greater Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 38-48. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44487. (In Russ.)
8. Popov Yu.V., Pustovit O.E., Tereshchenko V.A. Accessory chrome spinels of serpentinites of tectonic melange of the Dakhov uplift (Greater Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 38-55. DOI: 10.46698/VNC.2020.21.55.003. (In Russ.)
9. Sobolev N.D. *Ultrabasic rocks of the Greater Caucasus*. Moscow. Gosgeolizdat, 1952. 240 p. (In Russ.)
10. Bach W., Paulick H., Garrido C.J., Ildefonse B., Meurer W., Humphris S.E. Unravelling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274). *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 25. pp. 1467-1470.
11. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *J. Petrol.* 2001. Vol. 42. pp. 2279-2302.
12. Candia M.A. F., Gaspar J.C. Chromianspinels in metamorphosed ultramafic rocks from Mangabal I and II complexes, Goiás, Brazil. *Mineral. Petrol.* 1997. Vol. 60. pp. 27-40.
13. Dick H.J. B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. Vol. 86 (1). pp. 54-76. DOI: 10.1007/BF00373711
14. Droop G. T. R. A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*. 1987. Vol. 51 (3). pp. 431-435.
15. Gervilla F., Padrón-Navarta J.A., Kerestedjian T., Sergeeva I., González-Jiménez J.M., Fanlo, I. Formation of ferric chromite in podiform chromitites from the Golyamo Kamenyane serpentinite, Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: A two-stage process. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2012. Vol. 164 (4). pp. 643-657.
16. Ghazi J.M., Moazzen M., Rahghoshay M., Moghadam H. S. The geodynamic setting of the Nain ophiolites, Central Iran: evidence from chromianspinels in the chromitites and associated rocks. *Ofioliti*. – 2011. – Vol. 36. No. 1. – pp. 59-76.
17. Grieco G., Merlini A. Chromite alteration processes within Vourinos ophiolite. *Int. J. Earth Sci.* 2012. Vol. 101. pp. 1523-1533.
18. Hodel F., Macouin M., Triantafyllou A., Carlut J., Berger J., Rousse S., Ennih N., Trindade R. I. F. Unusual massive magnetite veins and highly altered Cr-spinels as relics of a Cl-rich acidic hydrothermal event in Neoproterozoic serpentinites (BouAzzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research*. 2017. Vol. 300. pp. 151-167.
19. Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: An empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42 (4). pp. 655-671
20. Kapsiotis A. Composition and alteration of cr-spinels from milia and pefkiserpentinized mantle peridotites (pindos ophiolite complex, Greece). *Geologica Carpathica*. 2014. Vol. 65 (1). pp. 83-95. DOI: 10.2478/geoca-2013-0006
21. Kimball K.L. Effects of hydrothermal alteration on the compositions of chromianspinels. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990. Vol. 105. pp. 337-346.
22. Merlini A., Grieco G., Diella V. Ferritchromite and chromianchlorite formation in mélange-hosted Kalkanchromitite (Southern Urals, Russia). *Am. Mineral.* 2009. Vol. 94. pp. 1459-1467.
23. Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-

subduction zone ophiolites. Kokelaar B. P., Howells M. F., eds., *Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins*: Geological Society of London Special Publication. 1984. Vol. 16. pp. 77-94.

24. Reed S. J. B. *Electron Microbe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press. 2005. 232 p.

25. Saumur B. M., Hattori K. Zoned Cr-spinel and ferritchromite alteration in forearc mantle serpentinites of the Rio San Juan Complex, Dominican Republic. *Mineralogical Magazine*. 2012. Vol. 77 (1). pp. 117-136. DOI: 10.1180/minmag.2013.077.1.11

26. Somin M. L., Levchenkov O. A., Kotov A. B., Makeev A. F., Komarov A. N., Ro N. I., Lavrishchev V. A., Lebedev V. A. The Paleozoic age of high-pressure metamorphic rocks in the Dakhov Salient, northwestern Caucasus: Results of U-Pb geochronological investigations. *Doklady Earth Sciences*. 2007. T. 416. No. 1. pp. 1018-1021.

27. Zaeimnia F., Kananian A., Arai S., Mirmohammadi M., Imamalipour A., Khedr M. Z., Miura M., Abbou-Kebir K. Mineral chemistry and petrogenesis of chromitites from the Khoy ophiolite complex, Northwestern Iran: Implications for aggregation of two ophiolites. *Island Arc*. 2017. Vol. 26 (6). №e12211. DOI: 10.1111/iar. 12211