

УДК 551.251

DOI: 10.31040/2222-8349-2019-0-3-24-31

УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД КЫШТЫМСКОЙ ТОЛЩИ (ИЛЬМЕНОГОРСКО-СЫСЕРТСКИЙ МЕГАНТИКЛИНОРИЙ)

© В.И. Сначёв, А.В. Сначёв

Приводится описание геологического строения кыштымской толщи, развитой в обрамлении ильменогорского метаморфического комплекса (Ильменогорско-Сысертский мегантиклинорий) и узкой полосой, огибающей Чашковский и Еланчиковский мигматит-гнейсогранитные массивы. В состав толщи входят амфиболиты, гранат-биотитовые гнейсы, кристаллосланцы, графит-сланцевые кварциты и мраморы (редко). В ассоциации с гранатом и биотитом в гнейсах и кристаллических сланцах отмечены ставролит, кианит, мусковит. Она интенсивно смята в мелкие складки, но в целом имеет моноклиальное восточное падение на меридиональном отрезке и южное падение на замыкании структуры на юге. Верхняя и нижняя границы толщи в пределах района в большинстве случаев тектонические, но по присутствию кварцитов в основании разреза можно предположить о несогласном ее залегании на еланчиковских гнейсах. Нижнепротерозойский возраст толщи принят в соответствии с Южно-Уральской серийной легендой и в настоящее время не охарактеризован радиологическими данными.

На основе изучения гранат-биотитового парагенезиса, всесторонне исследованного экспериментально и широко представленного в породах кыштымской толщи, получены температура и давление регионального и зонального их контактового метаморфизма ($T = 470\text{--}500^\circ\text{C}$, $P = 6.0\text{--}6.3$ кбар), что соответствует условиям эпидот-амфиболитовой фации и абиссальной зоне глубинности.

Рассмотрение петрохимических особенностей амфиболитов и графитистых кварцитов позволило реконструировать палеогеодинамические и палеогеографические условия их образования. С учетом полученных физико-химических параметров метаморфизма можно предположить, что породы кыштымской толщи сформировались в нижнем протерозое в относительно глубоководных условиях в рифтогенно-континентальной геодинамической обстановке и в дальнейшем испытали метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Связано это со структурной перестройкой Южного Урала на рубеже рифея и венда, а также тепловым воздействием близ расположенных палеозойских гранитоидных массивов (Кисегачского и Аргазинского) и гранитно-гнейсовых куполов (Чашковского и Еланчиковского).

Ключевые слова: кыштымская толща, Ильменогорско-Сысертский мегантиклинорий, метаморфизм, амфиболиты, кварцитосланцы, графитистые кварциты, температура, давление.

Кыштымская толща (PR₁kš) распространена в обрамлении ильменогорского метаморфического комплекса и узкой полосой огибает Чашковский массив гранитов и Еланчиковскую антиформную структуру (рис. 1). Согласно геолого-съемочным работам, проведенным авторами данной статьи и сотрудниками ОАО «Челябинскгеосъемка» в 1997–2001 гг. (лист N-41-VII, Миасс, М 1:200 000) (Петров и др., 2002ф), в состав толщи входят: амфиболиты (в том числе гранатовые), гнейсы (биотитовые, гранат-биотитовые, амфибол-биотитовые), пироксен-плагиоклазовые кристаллосланцы, гранат-ставролит-биотитовые сланцы, слюдяные и графит-сланцевые кварциты и очень редко мраморы. Она интенсивно смята в мелкие складки, но в

целом имеет моноклиальное восточное падение на меридиональном отрезке и южное падение на замыкании структуры на юге, подчиняясь форме Еланчиковской антиформной структуры и Чашковского гранитного массива. Хороших опорных разрезов кыштымской толщи нет, фрагменты их известны лишь вдоль Уфимского тракта и по северному берегу оз. Б. Миассово. Наиболее хорошо обнажены узкие грядки маркирующих графитистых кварцитов. Верхняя и нижняя границы толщи в пределах района в большинстве случаев тектонические, но в разрезе по перемычке между озерами Б. Еланчик и Кундравинским вскрыт нормальный контакт между мусковит-биотитовыми гнейсами еланчиковской и кварцитами кыштымской толщ.

СНАЧЁВ Владимир Иванович – д.г.-м.н., Институт геологии УФИЦ РАН, e-mail: SAVant@inbox.ru

СНАЧЁВ Александр Владимирович – к.г.-м.н., Институт геологии УФИЦ РАН, e-mail: SAVant@rambler.ru

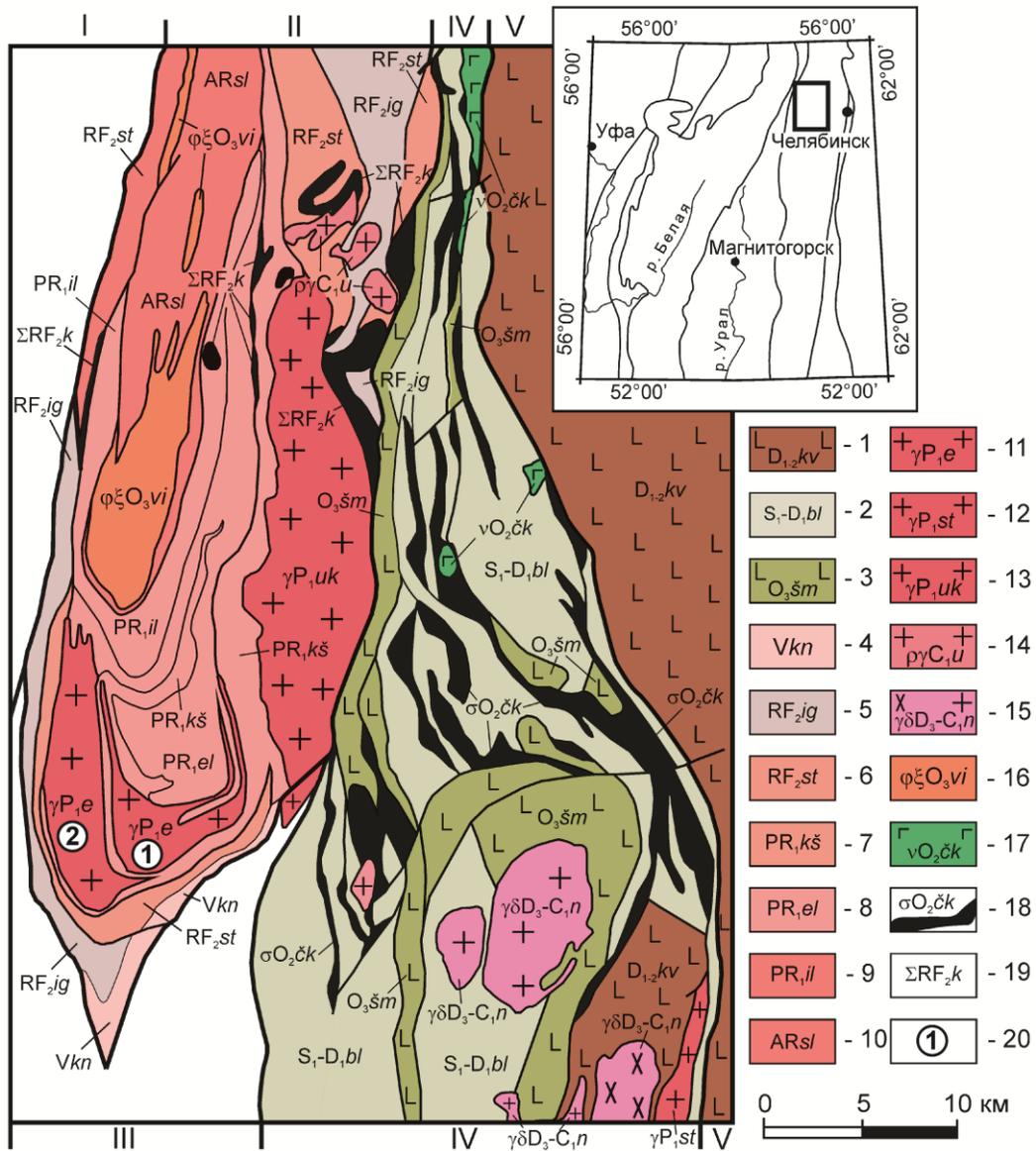


Рис. 1. Геологическая карта Ильменогорско-Сыертского мегантиклинория и восточного его обрамления (составлена по материалам В.И. Петрова)

Условные обозначения: 1 – кулуевская толща (лавы и лавобрекчии базальтов, реже андезибазальтов); 2 – булатовская толща (сланцы углеродисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые); 3 – шеметовская толща (базальты, андезибазальты); 4 – кундравинская свита (метагравелиты, метапесчаники с прослоями мраморизованных известняков); 5 – игишская свита (кварциты графитистые, графитистые кварцито-сланцы); 6 – сайтовская свита (плагосланцы амфиболовые, гранат-биотит-амфиболовые); 7 – кыштымская толща (амфиболиты, гнейсы гранат-биотитовые); 8 – еланчиковская толща (гнейсы биотитовые, амфибол-биотитовые); 9 – ильменогорская толща (амфиболиты, плаггиогнейсы биотитовые); 10 – селянчинская свита (плаггиогнейсы биотитовые, гранат-биотитовые); 11 – еланчиковский комплекс гранитовый; 12 – степнинский комплекс монцодиорит-граносиенит-гранитовый; 13 – увильдинско-кисегачский комплекс монцодиорит-граносиенит-гранитовый; 14 – уразбаевский комплекс тоналит-плаггиогранитовый; 15 – неплюевский комплекс диорит-гранодиорит-гранитовый; 16 – вишневогорско-ильменогорский комплекс карбонатит-миаскитовый; 17 – чебаркульско-казбаевский комплекс серпентинизированных дунитов, гарцбургитов; 18 – чебаркульско-казбаевский комплекс габбровый; 19 – каганский комплекс метаморфизованных ультрамафитов и габброидов; 20 – гранитоидные массивы: 1 – Еланчиковский, 2 – Чашковский.

Римскими цифрами показаны зоны: I – Вознесенско-Присакмарская и Западномагнитогорская, II – Ильменогорско-Сыертская, III – Уйско-Новооренбургская, IV – Арамилско-Сухтелинская, V – Касаргино-Рефтинская

Усредненный разрез рассматриваемой толщи состоит из трех пачек. Первая из них мощностью 145 м состоит из амфиболитов, составляющих 53%, гнейсов – 34%, кварцитов – 3%, мраморов – 10%; вторая (существенно кварцито-сланцевая) мощностью 380 м представлена биотитовыми и двуслюдяными сланцами, иногда с гранатом и графитом, составляющими 63%, слюдяными и графит-слюдяными кварцитами – 32% и амфиболитами – 5%; третья (сланцевая) более грубослоистая мощностью около 450 м, в которой амфиболиты составляют 31%, гнейсы и сланцы – 62% и кварцитов – 7%. Мраморы в составе толщи являются довольно редкими породами, но на разных участках они приурочены к нижним ее частям.

Плаггиогнейсы характеризуются довольно равномерным распределением биотита, имеют серую окраску, плитчатую отдельность и являются более мелкозернистыми по сравнению с гнейсами нижележащих толщ (здесь и далее петрографическое описание пород приведено по В.И. Петрову и др., 2002ф). Их состав: биотит 10–20%, плагиоклаз (№№ 3–4 до 42–44) – 55–60%, кварц 20–25%, гранат до 1%, акцессорные – апатит, циркон, ильменит. К новообразованиям относятся калишпат и кианит, содержания которых не более 1%. Окраска биотита оранжево-красная или зеленая, железистость 58.3–62.5%, содержание TiO_2 – 2.96–3.37%. Кварциты и кварцитосланцы содержат кроме кварца в небольшом количестве плагиоклаз (1–5%), биотит и мусковит. В составе графитсодержащих разновидностей кварцитов, представляющих собой благоприятную геохимическую среду для образования благороднометалльного оруденения [1, 2], установлены: плагиоклаз (1–5%), биотит (1–5%), апатит (2–3%) и кварц (87–90%). Биотит в них имеет оранжево-красную и буровато-красную окраску.

Амфиболиты толщи довольно разнообразны по составу и текстурно-структурным характеристикам. В их состав входят: плагиоклаз (15–60%), кварц (2–3%), гранат (до 5%), куммингтонит (до 15%), диопсид (до 30%) и магнетит (до 3%). Плагиоклаз и роговая обманка присутствуют во всех разновидностях амфиболитов, а куммингтонит, гранат и диопсид заменяют друг друга, участвуя в составе куммингтонитовых, гранатовых и диопсидовых амфиболитов. В акцессорных количествах присутствуют апатит, эпидот и сфен. Кварц встречается в основном в гранатовых амфиболитах. Состав плагиоклаза в амфиболитах имеет широкий диапазон колебаний от № 27 до 56. Роговая обманка плеохроирует от синевато-зеленого по Ng и Nm

до желто-зеленого по Np, C: Ng = 17°, 2V колеблется от 64 до 86°. Гранат образует порфиروبласты размером до 1.0–2.5 мм в форме ромбододекаэдров, а иногда менее совершенных зерен, изъеденных амфиболом и плагиоклазом, содержит включения кварца, рудного минерала, амфибола. Куммингтонит является игольчатым, для него характерны гомоосевые сростания с роговой обманкой, в шлифах – бесцветен, 2V = 84–88°. Диопсид бледно-зеленый и бесцветный, C: Ng = 42°, 2V = 60–61°. В амфиболитах известны участки с пятнистым размещением светлого плагиоклазового агрегата на месте порфирированных вкрапленников.

Среди биотитовых сланцев также встречаются различия с порфирированными обособлениями плагиоклаза, их химический состав близок к составу плаггиориодацитов. Диопсид-плагиоклазовые кристаллосланцы состоят из кварца (20–30%), плагиоклаза (50–60%), диопсида (20–30%), сфена (<1%), магнетита (<1%), апатита (<1%), из новообразований в них встречаются скаполит, эпидот, калишпат и роговая обманка.

Условиям метаморфизма пород толщи отвечают фации ставролитовых сланцев или эпидотовых амфиболитов. Об этом свидетельствуют редкие находки ставролитовых сланцев в составе толщи. Нижнепротерозойский возраст толщи принят в соответствии с Южно-Уральской серийной легендой и в настоящее время не охарактеризован радиологическими данными. Химический состав амфиболитов и графит-слюдяных кварцитов приведен в табл. 1.

Главной целью данной статьи является установление *P-T* условий и фаций метаморфизма пород кыштымской толщи на основе изучения биотит-гранатового парагенезиса, широко представленного среди гнейсов, кристаллосланцев, сланцев и всесторонне изученного экспериментально [3, 4]. Составы минералов, отобранные из пород толщи (табл. 2), проанализированы И.А. Блиновым (ИМин УрО РАН, г. Миасс) на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3sbu с энерго-дисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение 20 кВ, эталоны для биотита – биотит, для граната – пироп, андрадит и гроссуляр). Их формулы рассчитывались по известной методике И.Д. Борнеман-Старынкевич [5], а затем с помощью диаграммы фазового соответствия магнетиальностей парагенезиса биотит-гранат [3] получены температуры и оценена глубина формирования пород. Следует отметить, что составы трех пар биотитов и гранатов (альмандин-спессартинового ряда) почти ничем не отличаются друг от друга.

Т а б л и ц а 1

Химический состав пород кыштымской толщи (мас. %)

Окислы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ппп	сумма
1	45.32	0.95	17.82	3.46	10.58	0.29	6.05	10.72	4.24	0.20	0	0	100.73
2	45.36	1.68	14.07	3.53	10.22	0.37	8.45	12.79	2.00	0.20	0.16	0.54	99.47
3	47.00	1.12	18.40	4.23	6.13	0.22	4.58	15.64	1.30	0.22	0.06	1.56	100.64
4	48.16	0.78	16.83	2.05	6.62	0.15	9.65	12.34	2.20	0.20	0	0	99.46
5	49.06	1.00	15.89	1.91	7.15	0.14	7.37	13.49	2.50	0.54	0.10	0.58	99.73
6	49.23	1.72	15.30	3.95	9.46	0.17	6.30	9.90	2.78	0.26	0.20	1.10	100.37
7	49.60	1.90	13.09	3.31	11.58	0.21	6.27	8.82	2.76	0.21	0.17	1.88	99.96
8	50.53	1.13	17.90	2.27	8.63	0.15	4.75	8.10	4.04	0.30	0.15	0.89	99.39
9	51.60	1.25	15.67	4.61	8.93	0.32	5.28	8.24	2.46	0.20	0.13	0	99.51
10	51.77	0.95	17.05	1.93	7.29	0.15	4.57	8.85	3.87	0.34	0.76	2.27	99.91
11	74.21	0.51	9.18	1.06	1.06	0.07	1.87	2.96	2.12	1.60	1.23	3.48	99.31
12	75.03	0.51	9.29	1.41	3.32	0.05	2.16	3.00	1.82	1.79	0.31	1.80	100.30
13	81.01	0.24	5.50	0.47	0.88	0.07	0.94	3.10	1.00	0.92	1.08	4.30	99.51
14	81.98	0.36	4.98	0.84	1.06	0.03	1.58	2.00	1.00	0.65	0.55	4.12	99.15
15	87.90	0.26	4.98	0.67	1.20	0.10	1.24	0.42	0.18	1.78	0.06	1.44	100.10
16	89.90	0.12	2.64	0.01	1.23	0.02	0.05	1.26	0.07	0.68	0.42	0.50	99.61
17	94.26	0.07	0.80	0.11	0.86	0.01	0.30	0.11	0.15	0.13	0.44	2.20	99.42

Примечание. 1–10 – амфиболиты. 11–17 – графит-слюдяные кварциты. Анализы заимствованы из отчета В.И. Петрова и др. (2001ф).

Т а б л и ц а 2

Состав биотита (Bi) и граната (Gr) пород кыштымской толщи (мас. %)

Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	X _{Mg} ^{Bi,Gr}
Bi-1	39.44	3.17	19.15	11.73	0.68	0	14.35	0.14	9.39	98.04	0.68
Bi-2	39.33	2.96	18.49	13.27	0.73	0	13.89	0.12	9.08	97.86	0.64
Bi-3	39.51	3.37	18.13	12.12	0.69	0	14.33	0	9.50	98.17	0.67
Gr-1	37.32	0	21.40	16.18	19.53	1.91	3.29	0	0	99.64	0.14
Gr-2	37.53	0	21.55	16.79	18.76	1.97	3.52	0	0	100.11	0.15
Gr-3	37.67	0	21.18	17.12	19.27	2.06	3.54	0	0	100.84	0.15

Bi-1 – (K_{0.87}Na_{0.02})_{0.89}(Mg_{1.56}Fe_{0.71}Mn_{0.04}Ti_{0.17}Al_{0.51})₃(Si_{2.87}Al_{1.13})₄O₁₀[O_{0.59}(OH)_{1.41}]₂

Bi-2 – (K_{0.85}Na_{0.02})_{0.87}(Mg_{1.51}Fe_{0.81}Mn_{0.05}Ti_{0.16}Al_{0.47})₃(Si_{2.88}Al_{1.12})₄O₁₀[O_{0.54}(OH)_{1.46}]₂

Bi-3 – (K_{0.89}Na_{0.00})_{0.89}(Mg_{1.57}Fe_{0.74}Mn_{0.04}Ti_{0.19}Al_{0.47})₃(Si_{2.90}Al_{1.10})₄O₁₀[O_{0.66}(OH)_{1.34}]₂

Gr-1 – (Ca_{0.17}Mg_{0.39}Fe_{1.09}Mn_{1.33})_{2.98}Al_{2.01}Si₃O₁₂

Gr-2 – (Ca_{0.17}Mg_{0.42}Fe_{1.12}Mn_{1.27})_{2.98}Al_{2.02}Si₃O₁₂

Gr-3 – (Ca_{0.18}Mg_{0.42}Fe_{1.11}Mn_{1.30})₃(Al_{1.97}Fe_{0.03})₃(Si_{2.99}Al_{0.01})₃O₁₂

Примечание. Bi-1 – (номер пробы 480-4, номер анализа 18481a); Bi-2 – (480-4, 18481b); Bi-3 – (480-4, 18481c); Gr-1 – (480-4, 18481d); Gr-2 – (480-4, 18481e); Gr-3 – (480-4, 18481f).

Обратимся к рис. 2, на котором в координатах X_{Mg} = Mg / (Mg+Fe+Mn) (значения мольных долей компонентов в биотите и гранате) вынесены точки составов для трех пар указанных метаморфических минералов. Как видим, все ассоциации образуют единое поле. Температуры их образования составляют 470–500°C. Вместе с тем расчет давления по известной температуре и коэффициенту lnK, где K = X_{Mg}^{Gr} / X_{Mg}^{Bi} [4] пока-

зал его значения в 6.0–6.3 кбара (рис. 3). Если вынести указанные данные на схему фаций регионального метаморфизма (рис. 4), то приходим к выводу, что породы кыштымской толщи испытали метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Примечательно, что согласно рис. 4, на котором показаны поля устойчивости кианита, андалузита, силлиманита, а также ставролита, в минеральной ассоциации с

биотитом и гранатом отмечен кианит (нижний предел по давлению – 4 кбара). Согласно В.В. Федыкину [6], в породах с избытком K_2O , SiO_2 и Al_2O_3 , к числу которых относятся образования кыштымской толщи, поле устойчивости ставролита ограничено температурами 475–625°C и давлением 2–10 кбар. Для рассматриваемых нами пород ставролит является вполне устойчивым метаморфическим минералом.

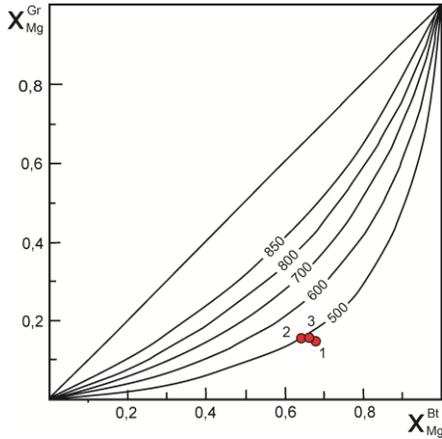


Рис. 2. Диаграмма фазового соответствия X_{Mg}^{Gr} – X_{Mg}^{Bi} в породах кыштымской толщи [4]. 500–800 – изограды температур образования гранат-биотитовой ассоциации, °C
Условные обозначения: кружочки – биотит-гранатовые пары (см. табл. 2)

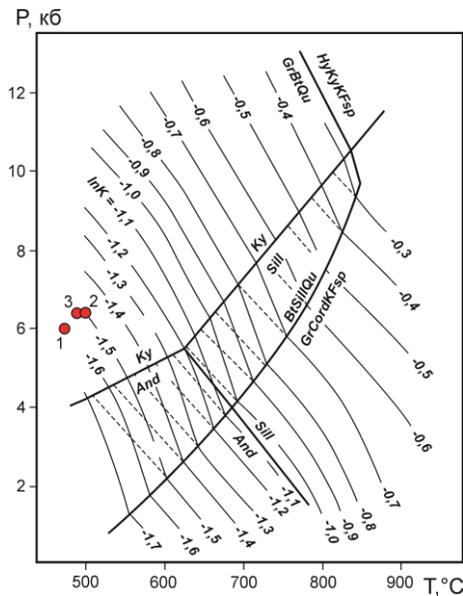


Рис. 3. Диаграмма P - T для определения давления по T и $\ln K$ в породах кыштымской толщи (точки 1–3, см. табл. 2) [4]. Поля минералов: And – андалузит, Ky – кианит, Sill – силлиманит, Bi – биотит, Gr – гранат, Cord – кордиерит, KFsp – калиевый полевой шпат, Qu – кварц, Ну – гиперстен

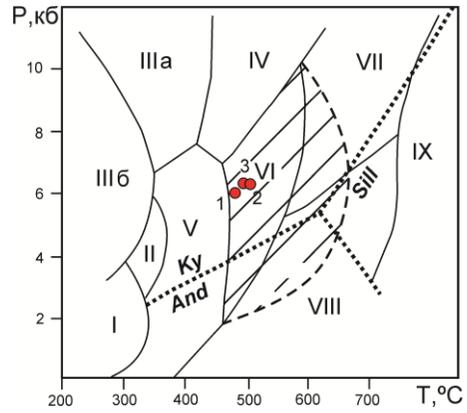


Рис. 4. Положение гранат-биотитовых пар (см. табл. 2) пород кыштымской толщи на петрогенетической диаграмме [4]

Примечание. Сплошные линии – границы фаций, заштрихованное поле – поле устойчивости ставролита, точками показана тройная диаграмма And-Sill-Ky. Римскими цифрами обозначены фации: I – цеолитовая или пумпеллиит-пренитовая, II – пумпеллиит-актинолитовая, IIIa – глаукофан-лавсонитовая, IIIб – глаукофан-цоизитовая, IV – цоизит-кианит-кварцевых сланцев, V – зеленых сланцев, VI – эпидотовых амфиболитов, VII – альмандиновых амфиболитов, VIII – куммингтоновых амфиболитов, IX – гранулитовая

Определенный интерес для реконструкции палеогеодинамических и палеогеографических условий формирования пород кыштымской толщи представляет рассмотрение петрохимических особенностей амфиболитов и графитистых кварцитов [7], образование которых связано с региональным и контактовым метаморфизмом соответственно базальтов и осадочных отложений. Основой для этого послужили силикатные анализы пород, приведенные в табл. 1. Как это следует из рис. 5, а, б, среди нижнепротерозойских основных эффузивов отмечены только толеитовые разновидности. Лишь одна проба попала в субщелочное поле. Составы амфиболитов на диаграммах $TiO_2 - (K_2O+Na_2O)$ и $TiO_2 - Al_2O_3/(FeO+Fe_2O_3+MgO)$ (рис. 5, в, г) расположились следующим образом: относительно высокотитанистые породы занимают нижние левые области в пределах полей эпиplatformенных и эпиорогенных континентальных рифтов, а низкотитанистые – среди поля срединно-океанических хребтов. Данный вывод можно считать предварительным. Для более точной реконструкции геодинамических условий образования основных эффузивов кыштымской толщи нужна заметно большая выборка пород и изучение в них редкоземельных и малых элементов.

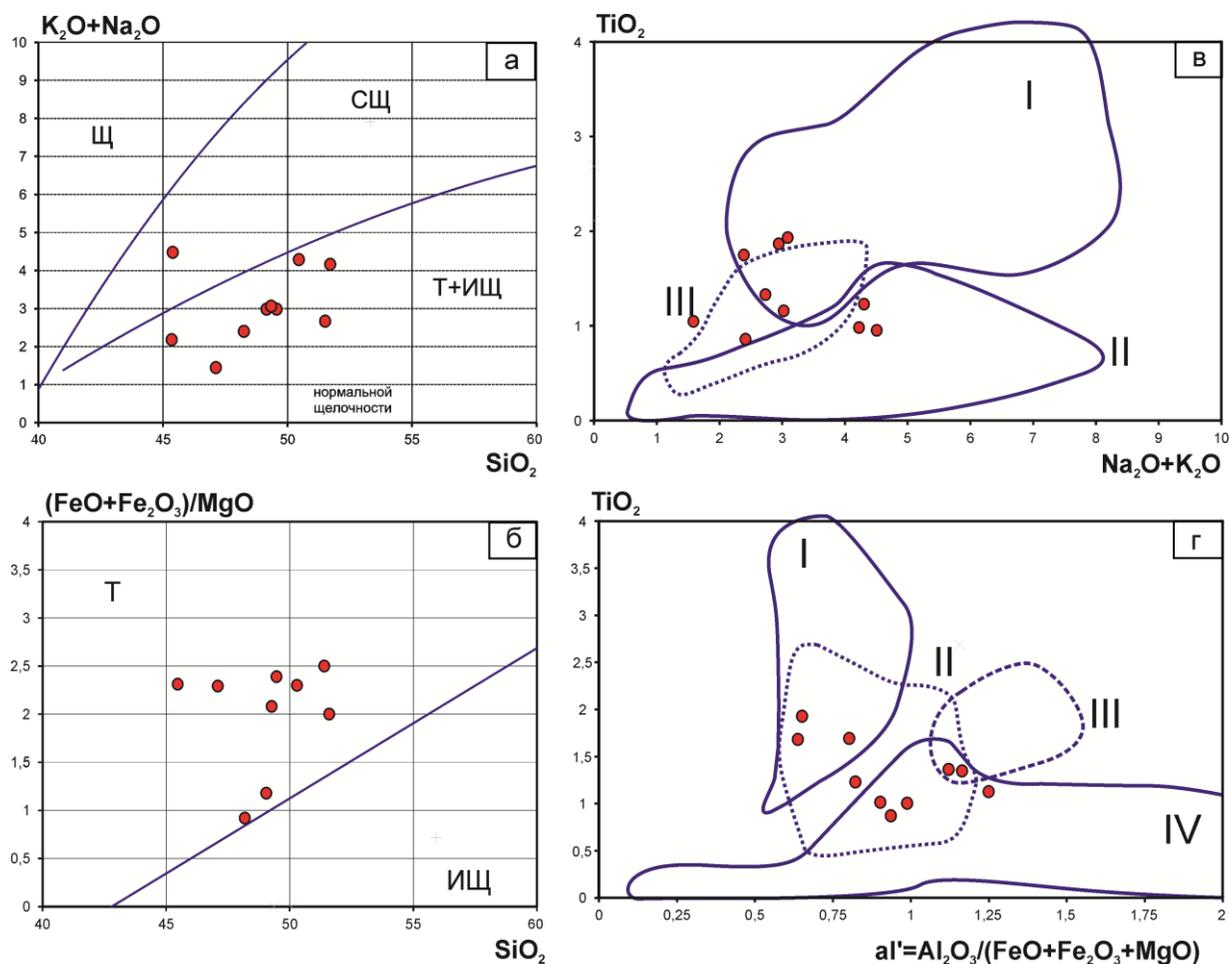


Рис. 5. Диаграммы $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (а), $\text{SiO}_2 - (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{MgO}$ (б), $\text{TiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (в) и $\text{TiO}_2 - \text{al}'$ (г) для амфиболитов кыштымской толщи

Поля составов базальтов: (а, б) – Щ – щелочное, СЩ – субщелочное, Т – толеитовое, ИЩ – известково-щелочное; (в) – I – эпиплатформенных континентальных рифтов, II – островных дуг, III – срединно-океанических хребтов; (г) – I – эпиплатформенных континентальных рифтов, II – срединно-океанических хребтов, III – эпиорогенных континентальных рифтов, IV – островных дуг. Поля составов базальтов заимствованы из работы Д.Е. Савельева и др. [8]

Углеродистые отложения представляют собой весьма информативные породы для реконструкции палеогеографических условий их накопления. Анализы, нанесенные на диаграмму A-S-C [9], показывают, что фигуративные точки образуют ряд по оси S от 1000 до 1600 ед. и относятся к кремнисто-углеродистой формации (рис. 6). Наиболее важным является параметр S, который связан обратнопропорциональной зависимостью с долей терригенной примеси в осадках, которая в свою очередь служит основным индикатором удаленности участка седиментации от береговой линии водного бассейна. Графитистые кварциты кыштымской толщи имеют незначительную долю терригенной примеси в их составе, что с большой долей уверенности позволяет отнести рассматриваемые

породы к относительно глубоководным. Этот вывод подтверждается и другими данными, в частности расчетными параметрами $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (закисный модуль), $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (титановый модуль) и Fe/Mn . Известно, что для осадочных пород, накапливающихся в глубоководном бассейне с восстановительной обстановкой, характерны величины $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 > 1$, $\text{Fe}/\text{Mn} < 40$ и $C_{\text{Al}_2\text{O}_3} < -10C_{\text{TiO}_2} + 8.5$. Для мелководного бассейна с окислительными условиями они составляют: $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1$, $\text{Fe}/\text{Mn} = 40-160$ и $C_{\text{Al}_2\text{O}_3} > -10C_{\text{TiO}_2} + 8.5$. Графитистые кварциты кыштымской толщи (табл. 1) имеют величины данных параметров соответственно в пределах: 1.0-7.8 ед.; 18-93 ед. и 0.04-0.09 ед. (последний в большинстве своем удовлетворяет неравенству $C_{\text{Al}_2\text{O}_3} < -10C_{\text{TiO}_2} + 8.5$).

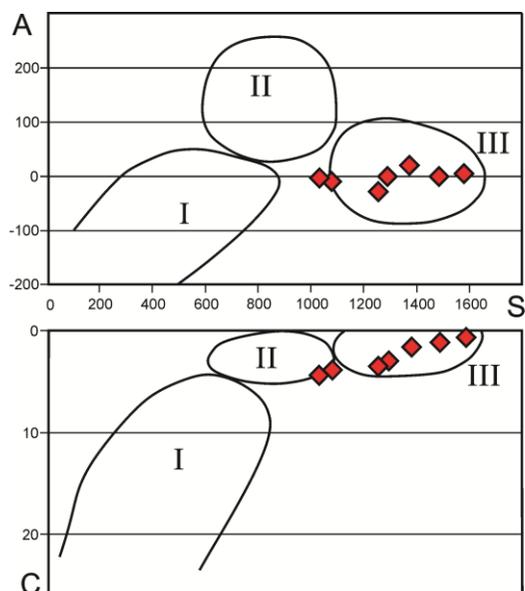


Рис. 6. Типизация графит-слюдяных кварцитов кыштымской толщи с помощью диаграммы О.В. Горбачева, Н.А. Созинова [9]

Поля формаций: *I* – карбонатно-углеродистая, *II* – терригенно-углеродистая, *III* – кремнисто-углеродистая. Параметры: $A = (Al_2O_3 - (CaO + K_2O + Na_2O)) \times 1000$ и $S = (SiO_2 - (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + CaO + MgO)) \times 1000$ выражены в молекулярных количествах, параметр $C = (CaO + MgO)$ – в массовых долях оксидов

Итак, учитывая приведенные выше данные по условиям образования и преобразования осадочных и вулканогенных пород кыштымской толщи можно предположить, что они сформировались в нижнем протерозое в относительно глубоководных условиях в рифтогенно-континентальной геодинамической обстановке и в дальнейшем испытали метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации при температурах 470–500°C и давлении 6.0–6.3 кбара. Связано это со структурной перестройкой Южного Урала на рубеже рифея и венда, а также тепловым воздействием близ расположенных палеозойских гранитоидных массивов (Кисегачского и Аргазинского) и гранитно-гнейсовых куполов (Чашковского и Еланчиковского) [10].

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 0246-2019-0078.

Литература

1. Рыкус М.В., Сначёв В.И., Кузнецов Н.С., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Сначёв А.В. Рудоносность

дунит-гарцбургитовой и черносланцевой формаций пограничной зоны между Южным и Средним Уралом // Нефтегазовое дело. 2009. Т. 7, № 2. С. 17–27.

2. Сначёв В.И., Сначёв А.В. Закономерности размещения золоторудных проявлений в углеродистых отложениях Белорецкого метаморфического комплекса (Южный Урал) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. № 2. С. 79–87.

3. Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: Недра, 1976. 287 с.

4. Термо- и барометрия метаморфических пород / под ред. В.А. Глебовицкого. Л.: Наука, 1977. 207 с.

5. Борнеман-Старынкевич И.Д. Руководство по расчету формул минералов. М.: Наука, 1964. 224 с.

6. Фёдкин В.В. Ставролит. М.: Наука, 1975. 250 с.

7. Савельев Д.Е., Сначёв А.В., Пучков В.Н., Сначёв В.И. Петрогеохимические и геодинамические особенности формирования ордовикско-раннесилурийских базальтов восточного склона Южного Урала // Геологический сборник № 5. ИГ УНЦ РАН. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2006. С. 86–104.

8. Сначёв А.В., Сначёв В.И. Палеогеодинамические условия формирования и петрогеохимические особенности базальтов пограничной зоны Южного и Среднего Урала // Известия Уфимского научного центра РАН. 2019. № 1. С. 107–117. DOI: 10.31040/2222-8349-2019-0-1-107-117

9. Горбачев О.В., Созинов Н.А. Некоторые петрохимические и геохимические аспекты типизации углеродистых отложений докембрия // Проблемы осадочной геологии докембрия. М.: Наука, 1985. С. 46–57.

10. Демин Ю.И., Сначёв В.И. Тепловые поля Ахуновского гранитного массива и закономерности размещения в них оруденения // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 261, № 1. С. 152–156.

References

1. Rykus M.V., Snachev V.I., Kuznetsov N.S., Savelyev D.E., Bazhin E.A., Snachev A.V. Ore-bearing capacity of the dunite-harzburgite and black shale formations of the border zone between the South and Middle Urals. *Neftegazovoe delo*, 2007, vol. 7, no 2, pp. 17–27.

2. Snachev V.I., Snachev A.V. Patterns of placement of gold occurrences in carbon deposits of the Beloretsk metamorphic complex (Southern Urals). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*. Ser: Geology, 2014, no 2, pp. 79–87.

3. Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. Phase correspondence in mineral systems. Moscow, Nedra, 1976. 287 p.

4. Thermo- and barometry of metamorphic rocks. V.A. Glebovitsky (ed.). Leningrad, Nauka, 1977. 207 p.

5. Borneman-Starynkevich I.D. Guidelines for the calculation of mineral formulas. Moscow, Nauka, 1964. 224 p.

6. Fedkin V.V. Staurolite. Moscow, Nauka, 1975. 250 p.

7. Savelyev D.E., Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I. Petrogeochemical and geodynamic features of the formation of the Ordovician-Early-Silurian basalts of the eastern slope of the Southern Urals. *Geologicheskii sbornik*, 2006, no 5, pp. 85–104.

8. Snachev A.V., Snachev V.I. Paleogeodynamic conditions for the formation of basalts and their

petrogeochemical characteristics in the boundary zone between the South and Middle Urals. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2019, no 1, pp. 107–117. DOI: 10.31040/2222-8349-2019-0-1-107-117

9. Gorbachev O.V., Sozinov N.A. Some petrochemical and geochemical aspects of the typization of Precambrian carbon deposits. *Problemy osadochnoy geologii dokembriya*. Moscow, Nauka, 1985, pp. 46–57.

10. DeminYu.I., Snachev V.I. Thermal fields of the Akhunovo massif and the regularities of mineralization distribution in them. *Doklady AN SSSR*, 1981, vol. 261, no 1, pp. 152–156.

CONDITIONS FOR METAMORPHISM OF ROCKS OF THE KYSHTYM SEQUENCE (ILMEN-SYSERT MEGANTICLINORIUM)

© V.I. Snachev, A.V. Snachev

Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
16/2, ulitsa Karla Marksa, 450077, Ufa, Russian Federation

The article describes the geological structure of the Kyshtym sequence developed in the frame of the Ilmen metamorphic complex (Ilmen-Sysert Meganticlinorium) and bending around the Chashkovsky and Elanchik migmatite-gneiss-granite massifs like a narrow strip. The sequence contains amphibolites, garnet-biotite gneisses, schists, graphite-mica quartzites and, rarely, marbles. Staurolite, kyanite and muscovite are found in association with garnet and biotite in gneisses and schists. It is intensely crumpled into small folds, but in general it has a monoclinial eastern dip at the meridional segment and a southern dip at the closure of the structure in the south. Within the region, the upper and lower boundaries of the sequence are mostly tectonic, but judging from the presence of quartzites at the basement of the section, it can be assumed not to agree with the Elanchik gneisses. The Lower Proterozoic age of the sequence is accepted according to the South Ural serial legend and is currently uncharacterized by radiological data.

Based on the garnet-biotite paragenesis comprehensively studied through experiments and widely represented in the rocks of the Kyshtym sequence, the temperature and pressure of their regional and zonal contact metamorphism were obtained ($T = 470\text{--}500^\circ\text{C}$, $P = 6.0\text{--}6.3\text{ kbar}$), this corresponding to the conditions of epidote-amphibolite facies and abyssal depths.

Consideration of the petrochemical features of amphibolites and graphitic quartzites made it possible to reconstruct the paleogeodynamic and paleogeographic conditions of their formation. Taking into account the obtained physicochemical parameters of metamorphism, it can be assumed that the rocks of the Kyshtym sequence were formed in the Lower Proterozoic under relatively deep-water conditions in the rift-continental geodynamic setting and then undergone metamorphism under conditions of the epidote-amphibolite facies. This is due to the structural rearrangement of the South Urals at the turn of the Riphean and Vendian, as well as thermal effects of the nearby Paleozoic granitoid massifs (Kisegach and Argazi) and granite-gneiss domes (Chashkovsky and Elanchik).

Key words: Kyshtym sequence, Ilmen-Sysert Meganticlinorium, metamorphism, amphibolites, quartzitic schists, graphitic quartzites, temperature, pressure.