

УДК 553.216(470.55)

**РОЛЬ ГАЛОГЕНОВ И СЕРЫ В АПАТИТАХ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ
РУДОНОСНОСТИ ПОЗДНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ГАББРОИДОВ
ЗАПАДНО-МАГНИТОГОРСКОЙ ЗОНЫ (Ю. УРАЛ) НА Cu-Ni, Fe-Ti и Au ОРУДЕНЕНИЕ**

В.В. Холоднов¹, Д.Н. Салихов², Е.С. Шагалов¹, Е.В. Коновалова¹, И.Р. Рахимов²

¹ *Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, holodnov@igg.uran.ru*

² *Институт геологии УНЦ РАН, г. Уфа*

**THE ROLE OF HALOGENS AND SULFUR IN APATITE FOR EVALUATION
OF Cu-Ni, Fe-Ti AND Au ORES IN LATE PALAEOZOIC GABBROIDS
OF THE WEST MAGNITOGORSK ZONE (SOUTH URALS)**

V.V. Holodnov¹, D.N. Salihov², E.S. Shagalov¹, E.V. Konovalova¹, I.R. Rahimov²

¹ *Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Ekaterinburg, holodnov@igg.uran.ru*

² *Institute of Geology USC RAS, Ufa*

Проведена типизация позднепалеозойских габброидов Западно-Магнитогорской зоны по соотношениям галогенов и серы в апатите. Для худолазовского комплекса, специализированного на Cu-Ni оруденение, типичен апатит с наиболее высокими содержаниями сульфатной серы. Установлена специализация поздних габбро-диоритов худолазовского комплекса на апатит-ильменитовое оруденение. Апатит в золотоносном улугуртауском дайковом комплексе имеет умеренно повышенное содержание хлора и низкое содержание сульфатной серы. Появление богатых апатитом поздних кальцитовых сегрегаций характеризует здесь состав позднемагматического флюида. Басаевский комплекс по соотношениям галогенов и серы в апатите не является аналогом утлыкташского комплекса, он (наличие серы) ближе тяготеет к худолазовскому комплексу. Показано, что конформные лополиты утлыкташского комплекса наряду со скарново-магнетитовым оруденением обладают потенциальной рудоносностью и на вкрапленное титаномagnetит-ильменитовое оруденение. Через состав амфиболов охарактеризованы фациальные обстановки кристаллизации пород. Сделан вывод о связи позднепалеозойских окраинно-континентальных интрузивных комплексов Худолазовской мульды с эволюцией единого мантийного (возможно, плюмового) магматического источника.

Илл. 7. Табл. 3. Библ. 18.

Ключевые слова: апатит, габброиды, галогены, сера, оруденение.

Late Paleozoic gabbroids of West Magnitogorsk area were classified according to correlations between halogens and sulfur in apatites. For Hudolazovsky complex specialized in Cu-Ni mineralization apatites with the highest content of sulphate sulphur are common. Specialization of later gabbro-diorites of Hudolazovsky complex for apatite-ilmenite mineralization was detected. Apatites in gold-bearing Ulugurtausky dike complex have moderately high chlorine content and low content of sulphate sulfur. The appearance of late apatite-rich calcite segregations characterizes local late-magmatic fluid composition. Basayevsky complex is not similar to Utlyktashsky according to correlations between halogens and sulfur in the apatites, it tends to be closer to Hudolazovsky complex due to the presence of sulfur. It is shown that conformal lopoliths of Utlyktashsky complex along with skarn-magnetite mineralization have potential of ore-bearing in impregnated titanomagnetite-ilmenite ore. The facial conditions of rock crystallization were characterized by the composition of amphiboles. It was concluded that Late Paleozoic continental-margin intrusive complexes of Hudolazovsky basin are related to the evolution of a single mantle magmatic source, plume possibly.

Figures 7. Tables 3. References 18.

Key words: apatite, gabbroids, halogens, sulfur, mineralization.

Введение

В истории формирования активной континентальной окраины Уральского палеоокеана и, в целом, Уральского эпикоеанического орогена выделяется этап $D_3-C_{1,2}$, который характеризует инверсию геодинамического режима с островодужного на аккреционно-коллизийный и трансформный сдвигово-рифтогенный, характерный для зон скольжения литосферных плит. В этот период существенно возрастает разнообразие продуктов магматизма, с формированием различных по составу, генезису, магматическим источникам и металлогении аккреционно-коллизийных (окарино-континентальных) и рифтогенных комплексов габброидов и гранитоидов, с четко проявленными в них надсубдукционными и внутриплитными геохимическими характеристиками. Формирование мантийных серий внутриплитного типа связывается с деструкцией субдуцирующей океанической плиты, образованием «slab-window» и подъемом горячих астеносферных диапиров к основанию литосферы (Салихов, Яркова, 1992; Иванов, 1998; Язева, Бочкарев, 1998; Ферштатер и др., 2005; Тевелев и др., 2006; Холоднов, Бочарникова, 2007; Нечухин и др., 2009; Пучков, 2010; Салихов и др., 2014).

С этапами усиления трансформных сдвигово-раздвиговых дислокаций и рифтогенеза на западе Магнитогорской мегазоны в этот период происходит образование обширных синклиналиных структур – мульд. На самом раннем этапе в бортах таких мульд формировались конформные вмещающим толщам интрузивные залежи, сложенные габброидами: от меланократовых через мезократовые до лейкократовых габбро, с плагиоклазитами, роговообманковыми габбро-долеритами и габбро-диоритами. Валовый состав этих комплексов в целом отвечает субщелочной базитовой серии внутриплитного типа, но с заметной долей субдукционно-го компонента (Салихов и др., 2014).

На территории Западно-Магнитогорской зоны (ЗМЗ) выделено три комплекса таких конформных интрузивных тел: утлыкташский в Имангуловской мульде, файзуллинский в Уртазымской мульде и басаевский в Худолазовской мульде. Они залегают среди вулканогенных отложений улутауской ($D_{2,3}ul$), мукасовской (D_3fr) и флишоидов зилаирской ($D_3fm-C_1t_1$) свит. Конформные тела этих комплексов секутся дайками диагонального и широтного простирания долеритов и микрогранитов кизильского комплекса. В связи с конформными

телами утлыкташского комплекса известно одно небольшое Канакайское месторождение скарново-магнетитовых руд (Скарново-магнетитовая..., 1989).

В Худолазовской мульде вслед за басаевским комплексом, который считается аналогом утлыкташского, и далее вслед за кизильским дайковым комплексом, формируется многофазный худолазовский комплекс. Он представлен интрузивами умереннотитанистых роговообманковых перидотитов (шрисгеймитов) – первая фаза, габбродолеритами, пегматоидным габбро, габбродиоритами и диоритами второй и третьей интрузивных фаз. К четвертой фазе относится формирование габбро-пегматитов и пегматитов основного, среднего и кислого состава. Интрузии худолазовского пикродолеритового комплекса имеют небольшие размеры: в десятки и первые сотни метров, редко – до первых километров по простиранию. Они прослеживаются вглубь на десятки и сотни метров, достигая в вертикальном разрезе (по скважинам) почти одного километра. Среди темноцветных минералов для пород этого комплекса характерны: оливин с форстеритовой составляющей от 67 до 80 %, клинопироксен типа авгита и диопсид-авгита, ортопироксен, отвечающий гиперстену, роговая обманка – от бурой до зеленовато-коричневой и биотит. Среди калиевых минералов выделяется зональный плагиоклаз. По химическому составу габброиды худолазовского комплекса отвечают высококальциевым толеитам и промежуточному типу между толеитами и известково-щелочными базитами.

Породы этого комплекса образуют диагональный пояс, рассекающий конформные залежи габброидов предшествующего басаевского комплекса и комплекс долерит-микрогранитовых даек кизильского комплекса. Время формирования худолазовского комплекса определено по данным изотопного U-Pb датирования зерен бадделеита и циркона из двух самостоятельных тел, оно составляет 328–324 млн лет (Салихов и др., 2012). Это соответствует серпуховскому ярусу нижнего карбона. ЗМЗ находилась в этот период в условиях стабильного субплатформенного режима.

Худолазовский комплекс контролирует небольшие по размерам месторождения и рудопроявления сульфидных медно-никелевых руд, связанных с отдельными груборасслоенными интрузивными телами. Контроль размещения сульфидных руд ограничен пределами конкретных интрузивных тел, с концентрацией рудных минералов в нижних

богатых оливином частях расслоенных залежей. Важным поисковым признаком являются собственно размеры рудоносных интрузий: в более крупных телах масштабы оруденения возрастают. Известно более 20 интрузивных тел с такой минерализацией, среди которых месторождения Бакр-Тау и Северный Бускун могут представлять в перспективе промышленный интерес. Детальная характеристика состава пород и металлогении худолазовского комплекса дана в специальной статье (Салихов и др., 2012).

Вслед за проявлением субплатформенного магматизма в ЗМЗ в последующее время восстанавливается влияние сдвигово-раздвиговых коллизионных процессов. Образуются дуплексы локального растяжения и сдвиговые деформации *на фоне общего аккреционно-коллизионного сжатия*. Они контролируют размещение малых интрузий, даек, месторождений и рудопроявлений золото-кварцевого оруденения. Роль коллизионных сдвигов в региональном структурном контроле месторождений золота на этом этапе рассмотрена в работах (Знаменский, 2009 и др.). В Худолазовской мульде в этот период формируются дайки габбродолеритов, долеритов и спессартитов улугуртауского комплекса. Они меридионально рассекают интрузивы более раннего худолазовского комплекса. Контактными зонами даек улугуртауского комплекса контролируются рудопроявления золото-кварцевого типа, в их числе месторождение Тукан. Изохронный Sm-Nd возраст этого комплекса 321 млн лет (Рахимов и др., 2014).

В Восточно-Магнитогорской зоне в этот период, с некоторым опережением во времени (340–330 млн лет), происходило образование крупных грабеновых структур, типа Магнитогорско-Богдановского грабена. Более мощный по масштабам вулcano-интрузивный магматизм внутриплитного типа в данном грабене сопровождался формированием крупных скарново-магнетитовых месторождений, пространственно и генетически тесно связанных с магнитогорским габбро-гранитным комплексом (Ферштатер, 1966; Холоднов, Бушляков, 2002; Ферштатер и др., 2005; Салихов и др., 2014 и др.).

Типизация позднепалеозойских габброидов Западно-Магнитогорской зоны по соотношениям галогенов и серы в апатитах

По соотношению хлора, фтора и серы в апатитах позднепалеозойские габброиды Западно-Маг-

нитогорской зоны Ю. Урала, независимо от их геологической позиции, состава и возраста, условно разделены на две группы.

Первую группу составили породы Худолазовской мульды, апатит в которых обогащен сульфатной серой (до 0.65 мас. %), изоморфной по отношению к фосфору в составе анионного комплекса $(\text{PO}_4)^{3-}$ (табл. 1, рис. 1). Он имеет пониженное содержание фтора (< 2 мас. %), при значительном содержании хлора (0.10–1.50 мас. %). Эту группу в Худолазовской мульде составили следующие комплексы габброидов в порядке времени их формирования: басаевский, кизильский, худолазовский и самый поздний улугуртауский. Из них именно пикродолеритовый худолазовский комплекс специализирован на Cu-Ni сульфидное оруденение, а поздний улугуртауский – на золотое, которое локализуется в контактовых зонах дайковых тел.

Вторую группу составляют габброиды других мульд Западно-Магнитогорской зоны. К ним относятся породы утлыкташского и файзулинского комплексов. Для габброидоритов утлыкташского комплекса отмечается специализация на скромное по масштабам скарново-магнетитовое оруденение. Апатит этой группы беден сульфатной серой (< 0.05 мас. %) или ее вообще не содержит. Он выделяется повышенными содержаниями фтора (> 2 мас. %) и хлора (до 1 мас. %) (табл. 2, рис. 1).

По соотношению хлора, фтора и серы апатиты этих двух групп можно дополнительно разделить на подтипы по составу материнских пород или условиям формирования составляющих их комплексов. Так, апатит худолазовского комплекса отличается как наиболее высокими содержаниями сульфатной серы (0.30–0.65 мас. %), при пониженном значении хлора и фтора, что характерно для шрисгеймита Кусеевского участка (проба Д₁-83), так и наиболее высокими содержаниями хлора (до 1.5 мас. %) в апатите оливинового габбро массива Аксинья (проба Д₁-065), при меньшем содержании сульфатной серы (0.10–0.30 мас. %) и минимальном содержании фтора (0.50–0.80 мас. %) (рис. 1). Апатит в габброидоритах Туркменевского участка (проба Д₁-40 и Д₁-40а) характеризуется повышенным содержанием фтора (до 2.10 мас. %), при минимуме сульфатной серы (менее 0.20 мас. %) и невысоком содержании хлора (до 0.40 мас. %).

Апатит габброидов басаевского комплекса характеризуется выдержанными содержаниями хлора (0.10–0.60 мас. %), при значительных вари-

ациях концентраций фтора: в апатите габбродиорита (Д₁-86) содержание фтора минимальное (1.0–1.3 мас. %), с содержанием хлора до 0.60 мас. %, в апатите габбродолеритов количество фтора увеличивается: в пробе Д₁-56 (1.40–1.90 мас. %), в пробе Д₁-59 (1.80–2.50 мас. %). Показательным здесь является распределение сульфатной серы. В апатите габбродолеритов ее содержание выше (0.10–0.45 мас. %), в сравнении с апатитом в габбродиорите (Д₁-86), где содержание этой серы минимально (< 0.05 мас. %). В апатите габбродолеритов рост концентраций сульфатной серы коррелирует с ростом содержания фтора (см. рис. 1), с максимумом серы (до 0.30–0.45 мас. %) в пробе Д₁-59 (верхняя часть габбродолеритовой интрузии), при некотором спаде содержания хлора.

Апатит в дайке габбродолеритов улугуртауского комплекса (проба Д₁-113) характеризуется умеренно повышенными содержаниями хлора (0.30–0.50 мас. %) и фтора (1.50–2.10 мас. %), на фоне низких содержаний сульфатной серы – до 0.10 мас. %.

Таким образом, в первой группе по соотношению сера–фтор, хлор–фтор в апатите можно выделить следующие ассоциации пород и комплексов: худолазовский комплекс – с максимальным содержанием сульфатной серы (и хлора) в апатите, затем более ранний басаевский с промежуточным

уровнем в содержаниях серы и хлора в апатите и повышенным содержанием фтора и, наконец, поздний улугуртауский комплекс, апатит которого имеет самые низкие содержания сульфатной серы, при повышенном содержании хлора.

Породы и комплексы второй группы по соотношению хлора и фтора в апатите (при отсутствии в их составах серы) можно дополнительно разделить на следующие ассоциации. По наиболее высокому содержанию хлора (0.60–0.85 мас. %) выделяется апатит в габбро фаизулинского комплекса (проба Д₁-120). Содержание хлора обратно пропорционально содержаниям фтора, с ростом последнего – количество хлора понижается. Апатит в габбродиоритах утлыкташского комплекса характеризуется содержанием хлора в диапазоне 0.20–0.35 мас. %. С породами утлыкташского комплекса, как показано выше, связано скарново-магнетитовое оруденение (Канакайское месторождение), хотя и сравнительно небольшое по масштабам.

Для габбродиоритов утлыкташского комплекса характерно также обилие Fe-Ti рудных минералов, представленных титаномагнетитом, ильменитом и продуктом их преобразования сфеном. Содержания титаномагнетита и ильменита в отдельных породах достигают 10 мас. %. Обильная рудная минерализация в таких породах тяготеет к выделениям темноцветных

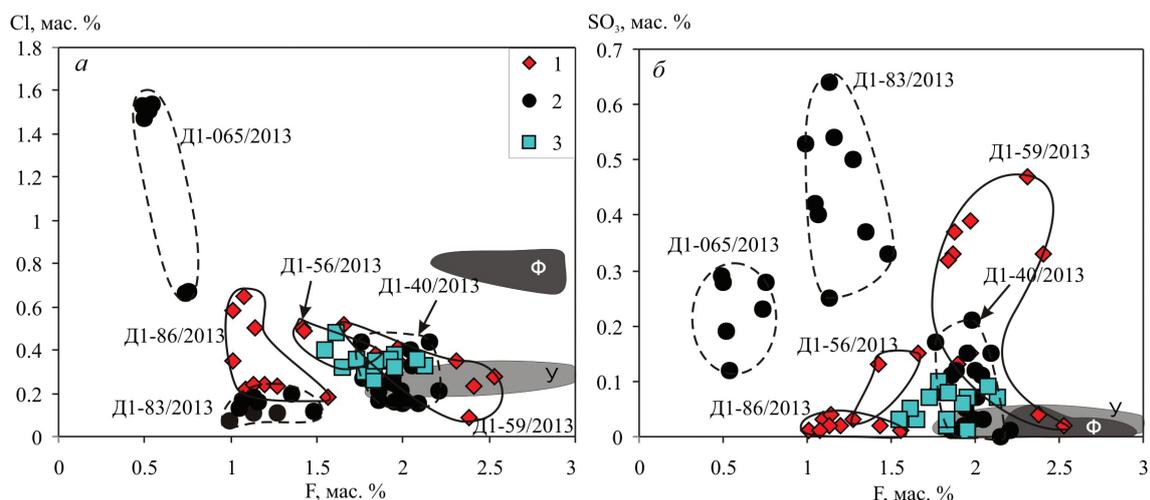


Рис. 1. Соотношения F, Cl и SO₂ в апатитах из пород различных комплексов Худолазовской мульды.

Комплексы: 1 – басаевский, 2 – худолазовский, 3 – улугуртауский. Полями показаны составы апатитов из пород утлыкташского (У) и фаизулинского (Ф) комплексов. Измерения всех минералов выполнены на микроанализаторе Cameca SX-100 по стандартной методике в ИГГ УрО РАН (аналитик Д.А. Замятин).

Fig. 1. Correlations between F, Cl and SO₂ in apatites from rocks of different complexes of Hudolazovsky basin.

Complexes: 1 – Basayevsky, 2 – Hudolazovsky, 3 – Ulugurtausky. Fields show the compositions of apatite from rock of Utlyktashsky (У) and Faizulinsky (Ф) complexes. The measurements of all minerals were carried out by microanalyzer Cameca SX-100 in IGG UB RAS (analyst D.A. Zamyatin).

Таблица 1

**Состав апатита (мас. %) в габброидах Худолазовской мульды
(басаевский, худолазовский и улугуртауский комплексы)**

Table 1

**The composition of the apatite (wt. %) in the gabbros of Hudolazovskoy trough
(basayevsky, hudolazovsky and ulugurtausky complexes)**

№ п.п.	CaO	SrO	BaO	FeO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F	Cl	SO ₃	Сумма
1	55.03	0.09	0	0.13	0.2	0.01	42.32	0.2	0.05	2.38	0.09	0.04	100.53
2	55.26	0.06	0.12	0.31	0.04	0.02	42.66	0.07	0.02	2.53	0.28	0.02	101.4
3	53.99	0.17	0	0.29	0.07	0.17	41.39	0.31	0.01	2.31	0.35	0.47	99.53
4	53.64	0.13	0	0.22	0.25	0.23	41.4	0.38	0.06	1.97	0.35	0.39	99.01
5	52.13	0.03	0.15	3	0.04	0.06	39.61	0.79	0.19	1.9	0.35	0.13	98.38
6	54.14	0.17	0	0.29	0.11	0.16	41.08	0.23	0.01	1.88	0.35	0.37	98.8
7	54.33	0.16	0	0.44	0.09	0.14	41.32	0.21	0.01	1.87	0.27	0.33	99.18
8	54.42	0.11	0	0.55	0.13	0.14	41.03	0.23	0	2.41	0.23	0.33	99.59
9	54.43	0.09	0	0.33	0.13	0.17	41.01	0.26	0.02	1.84	0.38	0.32	98.97
10	53.42	0.04	0	0.66	0.06	0.08	40.91	0.53	0.04	1.97	0.41	0.15	98.26
11	53.84	0.01	0.1	0.25	0	0.04	41.19	0.36	0.03	1.66	0.52	0.15	98.15
12	54.05	0.1	0	0.23	0.06	0.04	41.18	0.33	0.01	1.42	0.5	0.13	98.05
13	54.15	0.09	0	0.43	0.05	0.01	41.2	0.14	0.03	1.43	0.49	0.02	98.04
14	53.21	0.07	0.02	0.39	0.03	0.03	40.3	0.27	0.02	1.45	0.39	0.07	96.25
15	53.39	0.04	0.06	0.23	0.06	0.04	40.26	0.38	0.01	1.43	0.33	0.12	96.36
16	53.77	0.12	0.01	0.23	0.09	0.05	40.26	0.43	0.01	1.67	0.27	0.2	97.11
17	54.51	0.1	0.13	0.35	0.02	0.06	42.49	0.18	0	1.03	0.39	0.05	99.32
18	54.1	0.07	0	0.33	0.14	0.01	42.33	0.28	0.03	1.2	0.24	0.02	98.75
19	54.45	0.1	0	0.28	0.13	0.01	42.35	0.23	0.01	1.09	0.22	0.03	98.9
20	54.76	0.11	0	0.35	0.1	0	42.49	0.2	0	1.56	0.18	0.01	99.75
21	54.38	0.09	0	0.39	0.03	0.03	42.56	0.15	0	1.27	0.23	0.03	99.16
22	54.39	0.1	0.05	0.55	0.12	0	41.99	0.24	0	1.14	0.5	0.04	99.14
23	53.95	0.06	0.21	0.53	0.06	0	41.37	0.36	0	1.01	0.58	0.01	98.13
24	54.42	0.07	0	0.32	0.11	0.03	41.61	0.13	0	1.01	0.35	0.01	98.06
25	54.55	0.07	0	0.46	0.08	0.04	42.35	0.11	0	1.13	0.24	0.02	99.04
26	54.35	0.04	0.03	0.29	0.06	0.04	42.36	0.09	0.01	1.08	0.65	0.01	99.01
27	54.48	0.1	0.24	0.36	0.09	0.04	42.48	0.04	0.01	1.93	0.26	0.02	100.05
28	54.23	0.11	0.38	0.35	0.1	0	41.66	0.3	0	1.95	0.16	0.15	99.41
29	54.76	0.15	0	0.46	0.1	0	41.98	0.19	0	2.04	0.4	0.11	100.19
30	54.7	0.15	0	0.55	0.13	0.01	42.02	0.17	0.01	2.05	0.33	0.03	100.15
31	54.33	0.07	0.04	0.37	0.11	0	42.01	0.25	0.02	2	0.15	0.12	99.47
32	54.81	0.12	0	0.25	0.09	0.04	41.56	0.17	0.01	1.94	0.28	0.05	99.31
33	54.57	0.15	0	0.34	0.08	0	42.06	0.27	0	1.86	0.17	0.11	99.61
34	54.19	0.08	0	0.45	0.08	0.03	41.94	0.14	0	1.86	0.21	0.01	99
35	54.5	0.09	0.08	0.51	0.12	0	41.82	0.12	0	2.01	0.17	0.07	99.49
36	54.62	0.1	0	0.5	0.08	0.03	41.67	0.25	0.03	1.98	0.16	0.21	99.64
37	54.19	0.09	0	0.98	0.13	0.03	40.66	0.25	0	2.09	0.15	0.15	98.74
38	54.78	0.08	0.2	0.59	0.09	0.04	41.38	0.18	0.02	2.21	0.21	0.01	99.8
39	54.77	0.14	0	0.48	0.14	0.01	41.81	0.14	0	1.99	0.21	0.03	99.72
40	54.64	0.06	0.01	0.67	0.15	0.04	41.57	0.26	0	2.15	0.44	0	99.99
41	54.46	0.08	0	0.3	0.07	0.02	40.78	0.4	0.02	1.76	0.44	0.17	98.48
42	54.68	0.11	0.05	0.34	0	0	41.5	0.27	0.01	1.89	0.35	0.12	99.31
43	54.47	0.13	0.06	0.26	0.07	0.07	41.45	0.21	0.02	1.89	0.36	0.01	98.99

Продолжение таблицы 1

№ п.п.	CaO	SrO	BaO	FeO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F	Cl	SO ₃	Сумма
44	54.82	0.05	0	0.21	0.09	0.03	41.67	0.16	0.01	1.94	0.25	0.06	99.29
45	54.67	0.07	0.01	0.34	0.15	0	41.69	0.2	0.01	1.77	0.27	0.08	99.25
46	53.55	0.03	0.03	0.72	0.1	0.25	41.28	0.08	0.01	0.5	1.47	0.28	98.29
47	54.11	0.07	0.03	0.49	0.05	0.07	41.19	0.03	0.02	0.54	1.54	0.12	98.26
48	52.3	0.11	0	0.53	0.06	0.42	40.48	0.2	0	0.49	1.53	0.29	96.41
49	53.88	0.05	0.09	0.81	0.11	0.13	40.95	0.12	0.03	0.52	1.51	0.19	98.39
50	53.97	0.05	0	0.35	0.08	0.1	40.44	0.35	0.01	0.75	0.67	0.28	97.05
51	54.13	0.05	0	0.71	0.02	0.14	40.93	0.15	0.02	0.74	0.66	0.23	97.78
52	53.01	0.07	0.01	0.36	0.07	0.21	41.27	0.25	0	1.35	0.2	0.37	97.18
53	52.85	0.08	0	0.69	0	0.28	39.56	0.65	0.02	1.13	0.11	0.64	96.02
54	50.26	0.02	0	1.04	0	0.18	39.08	2.21	0.37	0.99	0.07	0.53	94.75
55	53.81	0.12	0.01	0.4	0.05	0.21	40.85	0.38	0	1.27	0.11	0.5	97.69
56	53.35	0.09	0	0.37	0.07	0.16	40.9	0.29	0	1.48	0.12	0.33	97.16
57	53.71	0.07	0	0.38	0.11	0.2	40.8	0.36	0	1.07	0.17	0.4	97.26
58	53.67	0.11	0.29	0.53	0.11	0.21	40.52	0.36	0.01	1.05	0.13	0.42	97.4
59	52.74	0.14	0.18	0.44	0.05	0.17	41.05	0.17	0	1.13	0.18	0.25	96.48
60	52.83	0.08	0.17	0.39	0.07	0.18	40.7	0.45	0	1.16	0.16	0.54	96.73
61	55.05	0.07	0	0.61	0.04	0.01	42.1	0.23	0	1.65	0.32	0.03	100.12
62	53.98	0.08	0.02	0.54	0.05	0	40.98	1.58	0.16	1.95	0.38	0.07	99.8
63	53.05	0.11	0.09	0.53	0.05	0.15	39.77	1.93	0.52	2.13	0.33	0.07	98.74
64	55.09	0.11	0.14	0.58	0.11	0.03	41.74	0.4	0.01	1.92	0.36	0.06	100.55
65	54.85	0.09	0	0.45	0.06	0.01	41.79	0.63	0.02	1.78	0.3	0.1	100.08
66	54.42	0.05	0	0.72	0	0.02	41.36	0.3	0.01	1.61	0.48	0.05	99.02
67	54.4	0.09	0	0.3	0.08	0.01	41.22	0.53	0.05	2.08	0.36	0.09	99.22
68	55.09	0.04	0.01	0.06	0.08	0.04	42.07	0.27	0.04	1.95	0.32	0.01	99.99
69	54.76	0.03	0.14	0.27	0.06	0.04	41.55	0.56	0.11	1.83	0.26	0.02	99.64
70	54.58	0.08	0.15	0.73	0.08	0.01	41.51	0.35	0.04	1.83	0.33	0.03	99.72
71	54.87	0.06	0	1.07	0.04	0	41.94	0.25	0.01	1.55	0.4	0.03	100.22
72	54.22	0.04	0.04	0.34	0.08	0.02	41.01	0.54	0.05	1.73	0.36	0.07	98.49
73	54.28	0.05	0.08	0.39	0.11	0.03	41.46	0.55	0.06	1.84	0.35	0.08	99.29

Примечание: Басаевский комплекс: 1–9 – габбродолерит (проба D₁-59), 10–16 – габбродолерит (проба D₁-56), 17–26 – габбродиорит (проба D₁-86); худолазовский комплекс: 27–45 – габбродиорит (проба D₁-40 и D₁-40a), 46–51 – оливиновое габбро (проба D₁-065), 52–60 – шрисгеймит (проба D₁-83); улугуртауский комплекс: 61–73 – габбродолерит, дайка (проба D₁-113).

Note: Basayevsky complex: 1–9 – (D₁-59) gabbrodolerite, 10–16 – (D₁-56) gabbrodolerite, 17–26 – (D₁-86) gabbrodiorite; hudolazovsky complex: 27–45 – (D₁-40, D₁-40a) gabbrodiorite, 46–51 – (D₁-065) olivine gabbro, 52–60 – schriesheimite (D₁-83); ulugurtausky complex: 61–73 – gabbrodolerite (D₁-113).

минералов, представленным скоплениями зерен клинопироксена и продуктом его замещения – эпидот-альбит-хлоритовым агрегатом. Титаномагнетит здесь представлен рядом разновидностей (проба D₁-11-1), от более хромистого (2.98 мас. % Cr₂O₃) высокотитанистого (11.83 мас. % TiO₂), местами сильно сфенизированного титаномагнетита, до сравнительно низкотитанистого (4.72 мас. % TiO₂) без хрома ти-

таномангнетита. Ильменит ассоциирует с высокотитанистым сфенизированным титаномагнетитом, он богат марганцем (3.86 мас. % MnO) и относительно беден железом (FeO* 44.26 мас. %). На общем рис. 2, характеризующем составы ильменитов в габброидах ЗМЗ, он образует самостоятельное поле, ближе тяготея к позднемагматическому ильмениту худолазовского комплекса. В другой ис-

Таблица 2

Состав апатита (мас. %) в габброидах утлыкташского и файзулинского комплекса

Table 2

The composition of the apatite (wt. %) in the gabbros of utlyktashsky and faizulinsky complexes

№ п.п.	CaO	SrO	BaO	FeO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F	Cl	SO ₃	Сумма
1	54.67	0.12	0.13	0.65	0.14	0	42.07	0.19	0	2.67	0.28	0	100.92
2	54.76	0.08	0.07	0.31	0.06	0.01	41.63	0.24	0	2.25	0.31	0.01	99.71
3	54.67	0.08	0.1	0.88	0.05	0	42.45	0.14	0	2.82	0.3	0.03	101.51
4	54.44	0.09	0.17	0.76	0.13	0.02	41.52	0.19	0	3.11	0.29	0	100.73
5	53.98	0.07	0	0.48	0.18	0.02	40.99	0.3	0.01	2.34	0.28	0.01	98.67
6	54.14	0.09	0.25	0.47	0.12	0.02	40.88	0.22	0	2.32	0.34	0.02	98.88
7	54.34	0.09	0	0.61	0.08	0	41.59	0.15	0	2.9	0.28	0.01	100.05
8	53.69	0.14	0	0.34	0.01	0	40.37	0.15	0.01	2.37	0.27	0.02	97.39
9	53.72	0.05	0	0.34	0.06	0.05	40.18	0.15	0	2.39	0.28	0.05	97.28
10	53.88	0.06	0.06	0.24	0.02	0.01	40.77	0.1	0	2.24	0.22	0	97.6
11	51.24	0.1	0	0.4	0.15	0.11	38.39	0.42	0.07	2.66	0.27	0.01	93.82
12	55.12	0.05	0	0.52	0.16	0.04	40.89	0.82	0.05	2.11	0.18	0.06	100
13	54.22	0.08	0	0.78	0.04	0.03	40.92	0.79	0.03	2.09	0.25	0.1	99.32
14	53.3	0.07	0	0.34	0.14	0.2	40.19	1.92	0.29	1.78	0.21	0.04	98.49
15	53.49	0.06	0	0.92	0.14	0.05	38.17	0.83	0.18	2.27	0.2	0.05	96.35
16	54.75	0.04	0	0.69	0.13	0.08	41.21	0.51	0.05	2.24	0.25	0.04	99.98
17	53.15	0.06	0	0.14	0	0.02	40.81	2.43	0.07	2.08	0.21	0.02	98.99
18	54.19	0.06	0	0.38	0.14	0.02	42.12	0.25	0.01	2.28	0.8	0.05	100.29
19	54.04	0.17	0.1	0.83	0.08	0.02	41.97	0.35	0.06	2.61	0.82	0.03	101.08
20	52.03	0.07	0.06	0.88	0.09	0.05	41.08	1.81	0.96	2.16	0.84	0.01	100.05
21	54.45	0.11	0	1.04	0.09	0.01	42.09	0.17	0.03	2.76	0.86	0	101.59
22	54.19	0.09	0.2	1.36	0.1	0	41.59	0.19	0.02	2.86	0.69	0.03	101.34
23	54.44	0.12	0	0.53	0.11	0.05	41.91	0.26	0.04	2.45	0.81	0.02	100.73
24	54.2	0.11	0.08	0.5	0.11	0.01	42.41	0.4	0.01	2.93	0.79	0	101.55

Примечание: Утлыкташский комплекс: 1–11 – габбродиорит (проба D1-11), 12–16 – диабаз, дайка (проба D1-14); файзулинский комплекс: 17–24 – габбро (проба D1-120).

Note: Utlyktashsky complex: 1–11 – gabbrodiorite (D1-11), 12–16 – diabase (D1-14); faizulinsky complex: 17–24 – gabbro (D1-120).

следованной пробе (D₁-11-2) рудные минералы также представлены титаномагнетитом с содержанием TiO₂ 8.98 мас. %, он сфенизирован, образует совместные агрегаты с ильменитом и вторичным рутилом. Все зерна ильменита имеют здесь высокие содержания марганца (3.84–4.09 мас. %) и низкие содержания железа (44.60–45.96 мас. %). Как и в пробе D₁-11-1 – это сравнительно более поздний относительно низкотемпературный минерал. Химические составы исследованных пород утлыкташского комплекса приведены в таблице 3, они характеризуются повышенными содержаниями титана, железа и фосфора.

Таким образом, конформные габбродиорит-долеритовые лополиты утлыкташского комплекса обладают потенциальной рудоносностью на вкрапленное титаномагнетитовое с повышенным содержанием хрома и ильменитовое оруденение. Масштабы этого оруденения будут определяться размерами лополитов и интенсивностью процессов кристаллизационно-гравитационной дифференциации. Специализацию на ильменит обнаруживают и поздние дайки диабазов и микропорфиритов (проба D₁-14), секущие утлыкташские лополиты. Здесь также диагностируется бедный железом (FeO* 43.09–43.36 мас. %) ильменит, обогащенный марганцем (3.68–3.78 мас. % MnO).

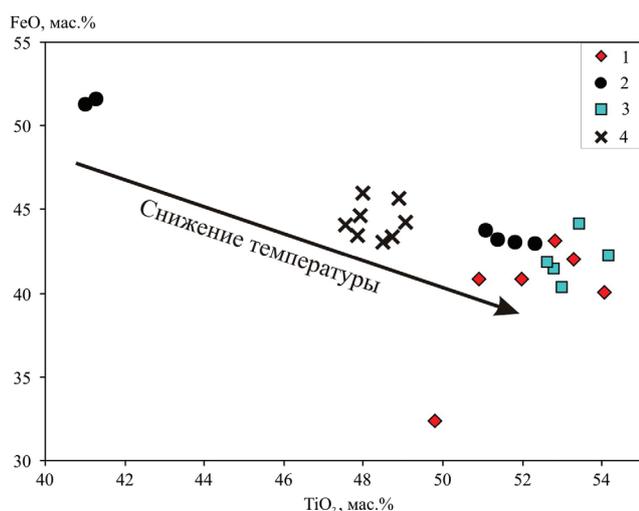


Рис. 2. Соотношение FeO и TiO₂ (в мас. %) в ильмените из пород различных комплексов ЗМЗ: 1 – басаевского, 2 – худолазовского, 3 – улугуртауского, 4 – утлыкташского.

Fig. 2. FeO and TiO₂ ratio (wt. %) in the ilmenite from rocks from different complexes WMZ: 1 – Basayevsky, 2 – Hudolazovsky, 3 – Ulugurtausky, 4 – Utlyktashsky.

Таблица 3

**Химический состав позднепалеозойских габброидов
Западно-Магнитогорской зоны**

Table 3

Chemical composition of Late Paleozoic gabbro of West Magnitogorsk area

Пробы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S _{общ}	ППП	Сумма
1. Д ₁ -11	52.94	2.35	14.01	14.72	0.24	3.16	4.79	4.33	1.14	0.54	0.014	2.65	100.88
2. Д ₁ -14	50.73	1.28	14.44	10.94	0.15	4.47	7.34	4.97	1.01	0.21	0.056	3.75	99.35
3. Д ₁ -116	50.72	0.72	17.35	11.25	0.14	5.72	6.41	2.74	1.40	0.15	0.010	3.82	100.45
4. Д ₁ -120	50.36	0.82	8.52	18.11	0.26	9.94	6.27	0.83	0.78	0.13	0.018	3.53	99.58
5. Д ₁ -86	52.00	1.00	18.00	7.11	0.13	8.00	8.00	2.37	0.54	0.13	н.о.	2.40	99.68
6. Д ₁ -112	51.00	1.40	16.10	9.18	0.16	8.00	9.50	2.00	0.55	0.20	н.о.	1.58	94.67
7. Д ₁ -40	51.76	1.48	18.38	9.84	0.15	2.65	6.22	4.98	0.85	0.45	0.011	1.84	98.62
8. Д ₁ -065	45.12	0.53	11.54	9.43	0.17	17.19	7.51	4.40	0.39	0.05	0.057	4.44	100.83
9. Д ₁ -83	43.00	0.83	9.60	10.31	0.15	25.00	2.84	0.27	1.02	0.13	н.о.	7.00	100.15
10. Д ₁ -113	51.00	1.65	16.50	9.07	0.15	6.40	8.40	3.34	0.65	0.35	н.о.	2.04	99.55

Примечание: Комплексы: 1–2 – утлыкташский, 3–4 – файзуллинский, 5 – басаевский, 6 – кизильский, 7–9 – худолазовский, 10 – улугуртауский. Анализы проб Д₁-83, Д₁-86, Д₁-112 и Д₁-113 выполнены методом «мокрой химии», остальные – РФА (ИГ УНЦ РАН, г. Уфа).

Note: Complexes: 1–2 – utlyktashsky, 3–4 – fayzullinsky, 5 – basayevsky, 6 – kizilsky, 7–9 – hudolazovsky, 10 – ulugurtausky. Analyses of samples D₁-83, D₁-86, D₁-112 and D₁-113 are made by «wet chemistry», the rest – XRF (IG USC RAS, Ufa).

Перспективы на дополнительное скарновое магнетитовое оруденение в связи с интрузиями утлыкташского комплекса не очень обнадеживающие. Это определяется не только относительно низкой их хлороносностью: в габбро-гранитных сериях, сопровождаемых крупными месторождениями железа скарново-магнетитовой формации, в апатите содержания хлора значительно выше и достигают

значений 2.5 мас. % и более (ранние фазы магнитогорского габбро-гранитного комплекса) (Холоднов, Бушляков, 2002 и др.), но и низкой фугитивностью кислорода в процессах петро- и рудогенеза.

Режим кислорода наряду с хлором имеет важное значение при формировании высокопродуктивных на скарново-магнетитовое оруденение серий магматических пород. Он определяет принадлежность

магматических пород к различным феррофациям (Ферштатер, 1987), характеризуя закономерности распределения Fe и Ti между силикатами с одной стороны и рудными минералами (ильменитом, магнетитом, сфеном) с другой. Режимом кислорода определяется доля силикатного железа в породах, железистость и степень окисления железа в силикатах, содержание титана в магнетите и его количество. На основе баланса железа и титана между силикатами и рудными минералами выделены титаномагнетитовая, магнетитовая, магнетитсодержащая и безмагнетитовая феррофации пород. В титаномагнетитовой феррофации, к которой и принадлежат исследованные породы утыкташского комплекса, с высокожелезистыми ($f > 0.60$) силикатами всегда ассоциирует титаномагнетит с высоким содержанием титана ($TiO_2 > 3-4$ мас. %). Здесь нет поздней низкотемпературной малотитанистой (< 1.0 мас. % TiO_2) разновидности магнетита, характерной для пород магнетитовой феррофации. В магнетитовой феррофации кроме того развиты силикаты (биотит и амфиболы) с низкой железистостью, которая обычно не превышает 0.45–0.50. При этом, чем эта величина меньше, тем выше содержание магнетита бедного титаном. Доля силикатного железа в породах этой феррофации снижается до 30 % и менее. Так, например, породы рудоносной магнитогорской габбро-гранитной серии на Южном Урале содержат низкожелезистый амфибол (f 0.30–0.35) и высокое количество низкотитанистого магнетита.

Апатит и другие минералы в габброидных комплексах Худолазовской мульды, как индикаторы специализации пород (худолазовский и улугуртауский комплексы) на Cu-Ni, Fe-Ti и Au оруденение

Худолазовский комплекс (Cu-Ni оруденение). В шрисгеймите (проба Д₁-83), одного из небольших штокообразных массивов у дер. Кусеево, несущих сульфидную вкрапленность, апатит образует ряд генераций. По петрографическому составу шрисгеймит – это амфибол-оливиновая порода (оливин 40 %, амфибол 40 %), с небольшим количеством плагиоклаза и массой вторичных минералов. Эти породы довольно сильно изменены поздними процессами серпентинизации, карбонатизации, хлоритизации, альбитизации и др. Химический состав исследованных пород худолазовского комплекса приведен в таблице 3.

В шрисгеймите исследованы включения апатита в раннем основном плагиоклазе № 66, включения в высокотемпературном богатом титаном амфиболе – керсутите с содержанием TiO_2 5 %, Al_2O_3 10.7 %, MgO 14.4 %, FeO 8.1 % и в биотите. Апатит образует также включения в серпентинизированном оливине и крупные игольчатые кристаллы, как бы «рассекающие» порообразующие минералы (рис. 3).

Все эти морфологические разновидности и генерации апатита варьируют, главным образом, по содержанию серы (от 0.25 до 0.64 мас. %). Это происходит практически независимо от того, образуют они включения в разных минералах или представлены крупными игольчатыми кристаллами. Наблюдается также общая тенденция роста содержания фтора (от 1 до 1.5 мас. %), в меньшей мере хлора (от 0.07 до 0.20 мас. %), при снижении содержания серы в апатите (см. рис. 1).

В апатите с наиболее высокими содержаниями серы снижается содержание фосфора (до 39–40 мас. % P_2O_5), против 41 мас. % в менее сернистом апатите, увеличивается содержание SiO_2 и Na_2O (см. табл. 1). Это определяется изоморфизмом серы и фосфора с компенсацией зарядов через вхождение в структуру апатита одновременно с серой – натрия и кремнезема.

По данным известных геотермобарометров (Hammarstrom, Zen, 1986; Otten, 1984 и др.) температура кристаллизации ($T_{кр}$) амфиболо-керсутита в шрисгеймите 985 °С, при P 5–6 кбар. Состав этого амфиболола показан на рис. 4, где он близок к ранним высокотемпературным амфиболом других комплексов Худолазовской мульды. Плагиоклаз в шрисгеймите образует несколько генераций, которые варьируют по составу: от основного № 65–70 до № 3 в зональных кристаллах. Железосодержащие рудные оксидные минералы в данной породе представлены богатым титаном (TiO_2 12.4 %) титаномагнетитом, вероятно с тонкими включениями хромшпинелидов (рис. 3).

Оливиновое габбро массива Аксинья (проба Д₁-065). Это габбро, в целом, типично для ранних фаз худолазовского комплекса. Массив Аксинья также находится рядом с дер. Кусеево. Апатит образует здесь две четкие генерации (см. табл. 1, рис. 1), которые характеризуют последовательность кристаллизации как самого апатита, так и минералов его включающих. Первая ранняя генерация – с наиболее высоким содержанием хлора до 1.50 мас. %, при содержании серы 0.10–

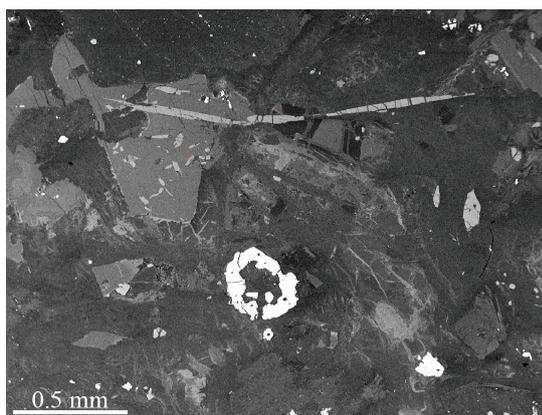


Рис. 3. Шрисгеймит D₁-83-2, BSE-изображение с точками анализа состава минералов.

Крупные трещиноватые кристаллы игольчатого апатита, ан. 4, 9, 10; многочисленные мелкие включения апатита (ан. 5) в амфиболе (ан. 6); крупный идиоморфный кристалл апатита (ан. 14) в биотите (ан. 15). Породообразующие минералы: 6 – амфибол, 7 – плагиоклаз (№ 66), 8 – альбит (№ 3), 11 – хлорит. Хромосодержащий титаномагнетит (ан. 12 и 13) с содержанием Cr₂O₃ 13.43 мас. % и TiO₂ 12.38 мас. %. Все анализы апатита в таблице 1.

Fig. 3. Schriesheimite D₁-83-2, BSE-image with points of analysis of mineral composition.

Large fissured needle crystals of apatite, an. 4, 9, 10; numerous small inclusions of apatite (an. 5) in amphibole (an. 6); large idiomorphic apatite crystals (an. 14) in biotite (an. 15). Rock-forming minerals: 6 – amphibole, 7 – plagioclase (№ 66), 8 – albite (№ 3), 11 – chlorite. Chromium-containing titanomagnetite (an. 12 and 13) contains Cr₂O₃ 13.43 wt. % and TiO₂ 12.38 wt. %. All analyses of apatite are in Table 1.

0.30 мас. % и низкой концентрацией фтора 0.50–0.60 мас. %. Вторая поздняя – с низким содержанием хлора около 0.65–0.70 мас. %, при слабом росте количества фтора до 0.75 мас. % и с тем же уровнем в содержаниях серы 0.20–0.30 мас. %. В целом, эти данные свидетельствуют, что материнский расплав для оливинового габбро на раннем этапе его кристаллизации был наиболее богат хлором, концентрации которого резко преобладали над содержанием окисленной серы, с отношением в апатите Cl/SO₃ = 7.5. На этапе постмагматического преобразования флюид характеризовался значительно более низкими содержаниями хлора, что отражает снижение в апатите отношения Cl/SO₃ до 2.5.

Апатит первой генерации, как показано на рис. 5 образует крупные порфиридные кристаллы, содержащие включения некоторых других минералов, с ростом содержаний FeO* к краям его кристаллов (от 0.49 до 0.81 мас. %, табл. 1, ан. 47 и 49). Более ранний апатит образует также включения (табл. 1, ан. 48) в ранних высокотемпературных роговых обманках богатых глиноземом и титаном, ассоциирует с первичным богатым титаном биотитом и с ранним высокотемпературным богатым железом ильменитом. Апатит второй генерации ассоциирует с поздними вторичными минералами (тремолитом, актинолитом и др.). Оливин в данной породе имеет более хорошую сохранность,

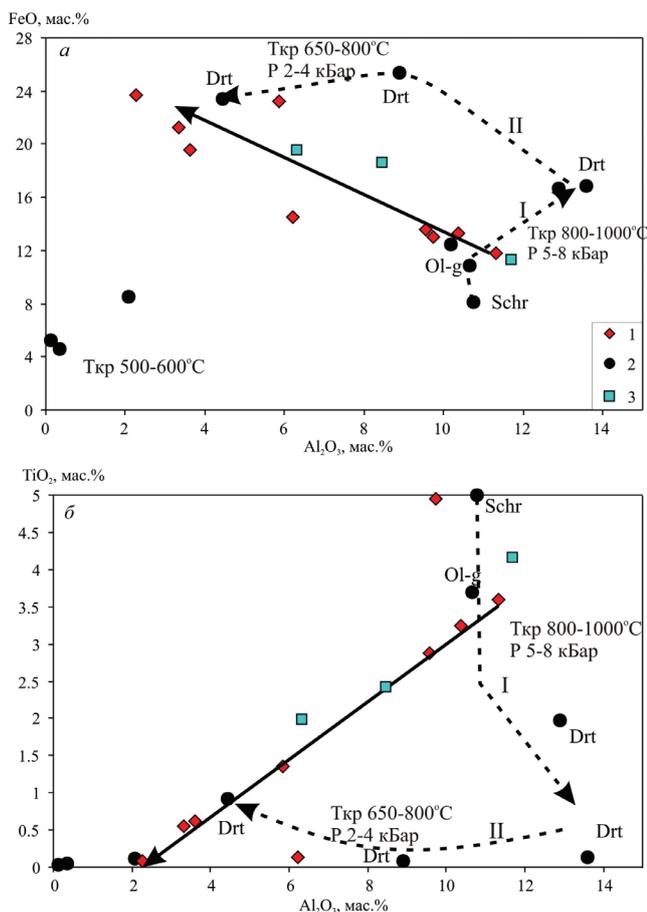


Рис. 4. Соотношения FeO, TiO₂, Al₂O₃ (в мас. %) в амфиболах из пород различных комплексов Худолазовской мульды: 1 – басаевского, 2 – худолазовского (Schr – шрисгеймит, Ol-g – оливиновое габбро, Drt – диорит), 3 – улугуртауского. Стрелками показаны направления эволюции состава амфиболов при их кристаллизации.

Fig. 4. FeO, TiO₂ and Al₂O₃ ratio (wt. %) in the amphibole from rocks of different complexes of Hudolazovsky basin: 1 – Basayeovsky, 2 – Hudolazovsky (Schr – Schriesheimite, Ol-g – Ol-gabbro, Drt – diorite), 3 – Ulugurtausky. The arrows indicate the direction of amphiboles composition evolution at their crystallization.

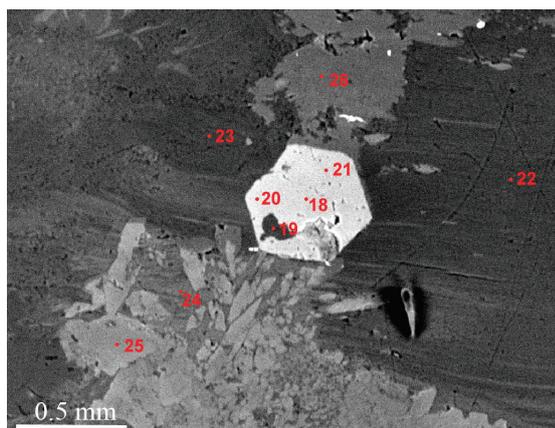


Рис. 5. Оливиновое габбро D_1 -065-4, BSE-изображение с точками анализа состава минералов.

Крупный кристалл апатита (поперечное сечение) с минеральными включениями; точки ан. апатита: 18 – центр кристалла, 20 и 21 – края, 19 – хлорит в составе минеральных включений. Окружающий минеральный парагенезис: точки ан. 22–24 – хлорит, 25 – ранний амфибол – эденит, 26 – поздний тремолит.

Fig. 5. Olivine gabbro D_1 -065-4, BSE-image with points of analysis of mineral composition.

Large crystals of apatite (cross section) with mineral inclusions; an. point apatite: 18 – center of the crystal, 20 and 21 – the rims, 19 – chlorite as a part of mineral inclusions. The surrounding mineral paragenesis: an. point. 22–24 – chlorite, 25 – early amphibole – edenite, 26 – late tremolite.

он представлен крупными зернами с включениями шпинелидов. Оливин содержит FeO 15.6–16.5 мас. %, MnO 0.23–0.28 мас. %. Хромшпинелиды разные по составу и варьируют от ферриалюмохромита до субферрихромпикотита.

Поздние вторичные минералы: амфиболы – точки анализов 11, 26 – тремолит, 29 – актинолит. Это бедные глиноземом и железом минералы, которые развиты в виде отдельных неправильных по форме зерен в хлорит-серпентиновой массе.

Раннюю роговую обманку (т. ан. 7) представляют идиоморфные кристаллы богатые титаном (TiO_2 – 3.7 мас. %) и Al_2O_3 (10.66 мас. %). Это магнезиогастингсит с $T_{кр}$ 990 °C и P 5.5 кбар. Здесь этот тип роговой обманки несколько более железистый (f 43), чем в шрисгеймите. Он на общей диаграмме амфиболов в породах Худолазовской мульды (рис. 4), располагается между ранними амфиболами шрисгеймита и габбродиорита (проба D_1 -40). Другие поздние разновидности амфиболов в оли-

виновом габбро массива Аксинья образуют каймы вокруг раннего магнезиогастингсита или отдельные выделения и сегрегации, варьируя по составу от эденита с f 47 ($T_{кр}$ 560 °C, P 5.1 кбар) до актинолита с f 31 ($T_{кр}$ 560 °C) и тремолита с f 17–20 ($T_{кр}$ 550 °C). Биотит, как и ранний амфибол, имеет повышенное содержание TiO_2 3.8 мас. %, он не содержит галогены. Плаггиоклаз соответствует № 75.

Анализ состава и порядка кристаллизации рудных минералов свидетельствует, что окислительный режим на раннем этапе кристаллизации оливинового габбро был более высоким, чем на завершающем. Это подтверждается ранней кристаллизацией оксидных железотитановых рудных минералов и хромшпинелидов, в сравнении с относительно более поздними никель- и кобальт-содержащими сульфидами. Наиболее ранний высокотемпературный ильменит имеет высокое содержание железа FeO 51.56 мас. % и низкое титана (TiO_2 41.28 мас. %). Этот ильменит в то же время беден MgO 0.11 мас. %, но обогащен MnO 3 мас. %. На общем рис. 2, характеризующем соотношение FeO и TiO_2 в ильмените различных комплексов Худолазовской мульды и в утыкташском комплексе, он попадает в верхнюю часть диаграммы, где располагается ильменит высокотемпературной группы.

Более поздние сульфиды в этой породе представлены крупным пирротинном с повышенным содержанием Ni 0.38 мас. %, который содержит мелкие включения (размером 15–20 мкм) халькопирита и кобальт-пентландита с содержанием Co 4.84 мас. %. Наличие сульфидов, содержащих медь, никель, кобальт свидетельствует о принадлежности оливинового габбро массива Аксинья к рудоносным породам худолазовского комплекса.

Пегматоидный габбродиорит (пробы D_1 -40 и D_1 -40a). Это порода в одной из последних фаз худолазовского комплекса, которая сечет более ранние сульфидоносные породы. Апатита в данной породе много. Это определяется высоким содержанием фосфора, см. таблицу 3. В пробе D_1 -40 содержание фосфора составляет 0.45 мас. %.

В целом, здесь апатит более однородный по содержанию галогенов и серы (см. табл. 1), чем в предыдущих пробах. При этом он заметно обогащен фтором (до 2 мас. %). Апатит образует здесь как игловидные кристаллы, «рассекающие» амфибол и плаггиоклаз, так и многочисленные включения в различных по составу разновидностях амфибо-

ла, включения в плагиоклазе и крупные обильные межзерновые выделения (рис. 6).

Наиболее ранний иглоподобный апатит, «рассекающий» амфибол и плагиоклаз, характеризуется самым низким количеством фтора 1.76 мас. %, при повышенном содержании хлора 0.44 мас. % и содержанием серы 0.17 мас. %. В нем наблюдается повышенное количество кремнезема 0.40 мас. % (табл. 1, ан. 41 и др.). В пробе Д₁-40 апатит, образующий включения в раннем высокотемпературном ($T_{кр}$ 780 °С, P 7.7 кбар) наиболее богатом TiO₂ (2 мас. %) амфиболе (чермаките) с железистостью 64, имеет сравнительно высокое содержание хлора 0.30–0.40 мас. %, при повышенном содержании фтора 2.05 мас. % и количестве серы 0.03–0.11 мас. %. Этот апатит выделяет и сравнительно высокое содержание железа 0.45–0.55 мас. % (табл. 1, ан. 29, 30). В апатите из включений в межзерновом плагиоклазе с № 15–27 содержание серы варьирует от 0.06 до 0.15 мас. %, при пониженном количестве хлора 0.15–0.25 мас. % и содержании фтора до 1.9–2.0 мас. % (см. табл. 1, ан. 28, 31, 32).

В поздней более низкотемпературной ($T_{кр}$ 655 °С, P 0.40 кбар) железистой (f 76), но бедной глиноземом и титаном роговой обманке включения апатита (ан. 34 и 35, см. табл. 1) содержат уже меньше хлора 0.17–0.21 мас. %, при содержании фтора 1.86–2.0 мас. %. На стыке зерен позднего плагиоклаза и амфибола апатит в одних случаях ближе по составу к апатиту, образующему включения в межзерновом плагиоклазе, с более высоким содержанием серы до 0.21 мас. %, при содержании хлора 0.16–0.17 мас. %, в других – к включениям апатита в амфиболе.

На рис. 4, амфиболы пегматоидного габбродиорита заметно отличаются по составу от амфиболов шприсгеймита и оливинового габбро. Главное отличие – это их более высокая железистость, при значительных вариациях в содержаниях глинозема и пониженных содержаниях титана. Здесь также наблюдается ранний амфибол с наиболее высоким содержанием глинозема и железа, он завершает тренд I (рис. 4а и б). Этот тренд характеризует ранние этапы кристаллизации пород в худолазовском комплексе. При этом этот ранний амфибол в габбродиорите относительно беден титаном, с содержанием TiO₂ не более 2 мас. %. Выделяется (см. рис. 4) целая серия и более поздних, по-видимому, также магматических амфиболов, в которых на фоне снижения содержаний алюминия растет железистость, тогда как содержания титана снижают-

ся до предельно низких значений до 0.10 мас. % и менее). Такие амфиболы на рис. 4б образуют свой особый тренд II. В шприсгеймите и оливиновом габбро таких низкотитанистых магматических амфиболов нет. Здесь самые поздние низкотемпературные и низкотитанистые, но уже метаморфические амфиболы представлены тремолитом и актинолитом. Они не только бедны алюминием и титаном, но и железом.

По-видимому, наличие тренда II в составе амфиболов пегматоидного габбродиорита определяется сбросом титана при их перекристаллизации в самостоятельную ильменитовую фазу. В связи с изменением P-T-условий и режима кислорода на поздне- и постмагматическом этапе в габбродиорите образуется мелкозернистый сегрегационный ильменит (см. рис. 6). Это обедняет состав перекристаллизованных амфиболов титаном, при сохранении в них высоких содержаний железа. При этом, в составе крупных кристаллов амфибола сохраняются промежуточные разновидности. По составу и условиям кристаллизации – это чермакиты с $T_{кр}$ 554 °С и P 4.3 кбар, их железистость 73.

Наряду с сегрегационным ильменитом, образующим мелкозернистую вкрапленность в амфиболах, пегматоидный габбродиорит содержит и обильную вкрапленность более крупного ильменита. Этот ильменит образует другую морфологическую разновидность: в виде крупных обособленных зерен в межзерновом плагиоклазе (см. рис. 6, ан. 18). По составу эти разновидности ильменита практически не различаются, они имеют высокое содержание TiO₂ 51–52.3 мас. % и низкое FeO* 43–43.8 мас. %, повышенное содержание MnO 2.9–3.2 мас. % и очень низкое содержание MgO 0.04–0.06 мас. %. На рис. 2 они концентрируются в правой нижней части диаграммы.

Улугуртауский дайковый комплекс завершает магматизм в Худолазовской мульде. Амфиболовый габбродолерит (проба Д₁-113). Апатит здесь характеризуется умеренно повышенным содержанием хлора 0.3–0.5 мас. %, при повышенном содержании фтора 1.5–2.1 мас. % и низких концентрациях серы – до 0.10 мас. %. Самый ранний апатит образует крупные иглы, которые «рассекают» амфибол и плагиоклаз (рис. 7, т. ан. 13 и 14). Он беден фтором 1.5–1.7 мас. %, содержание хлора 0.36–0.40 мас. %, серы 0.03–0.07 мас. %. Имеет относительно высокое содержание железа (0.35–1.0 мас. %, см. табл. 1, ан. 71 и 72).

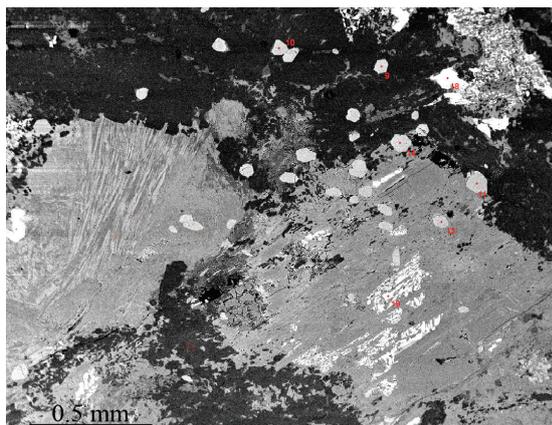


Рис. 6. Габбро-диорит D₁-40-2, BSE-изображение с точками анализа состава минералов. Здесь демонстрируется пример «кучного» распределения апатита, практически вне связи с границами породообразующих минералов. Проанализированы включения апатита в межзерновом плагиоклазе (№ 14–17), т. ан. 9 и 10; апатит на стыке с амфиболом, т. ан. 11, 14; его более мелкие включения в самом амфиболом, т. ан. 12 и 13. Другие минералы: поздний межзерновой плагиоклаз, т. ан. 20; один из поздних амфиболов (чермакит), т. ан. 17; вторичные минералы в структурах распада или замещения этого амфибола, т. ан. 15 и 16; мелкозернистый вторичный ильменит в структуре распада амфибола, т. ан. 19; крупный ильменит в межзерновом плагиоклазе, т. ан. 18.

Fig. 6. Gabbro-diorite D₁-40-2, BSE-image with points of analysis of mineral composition. Here an example of «heap» allocation apatite is shown, virtually out of touch with the boundaries of rock-forming minerals. Inclusions of apatite in the intergranular plagioclase (№ 14–17) were analysed, an. 9 and 10; apatite at the junction with amphibole, an. 11, 14; its smaller inclusions in the amphibole, an. 12 and 13. Other minerals: late intergranular plagioclase, an. 20; one of the later amphibole (Tschermakite), an. 17; secondary minerals in the decay or replacement structures of amphibole, an. 15 and 16; fine-grained secondary ilmenite in decay structure of amphibole, an. 19; large ilmenite in intergranular plagioclase, an. 18.

Другая генерация апатита представлена длиннопризматическими включениями в амфиболом (ан. 66 и 70 в таблице 1) и в плагиоклазе (ан. 73): первые из них бедны фтором 1.60–1.80 мас. % и обогащены хлором 0.33–0.48 мас. %, содержание серы 0.03–0.05 мас. %, при повышенном количестве железа 0.72 мас. %. Вторые, образующие включения в межзерновом плагиоклазе, имеют повышенное

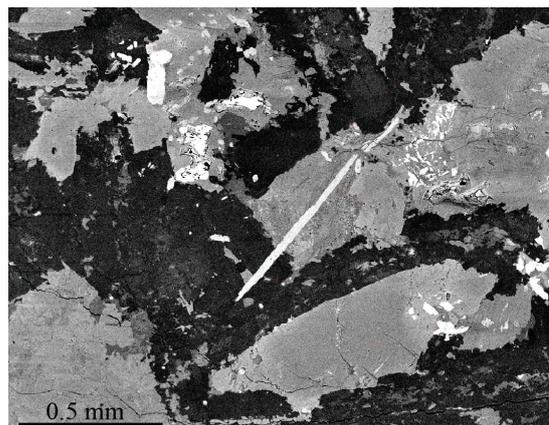


Рис. 7. Габбродолерит D₁-113-3а, BSE-изображение с точками анализа состава минералов. Игла апатита, которая «рассекает» амфибол и межзерновой плагиоклаз, т. ан. 13 и 14; мелкое включение апатита в межзерновом плагиоклазе, т. ан. 21. Анализы других минералов: амфибол, центр кристалла, т. ан. 15; в нем ряд включений мелкозернистого ильменита, т. ан. 17; вокруг этих включений амфибол меняет свой состав, т. ан. 16. Состав плагиоклаза в интерстициях, т. ан. 18 и 19 (№ 29, 54, соответственно); одна из поздних генераций амфибола, т. ан. 20; крупное включение ильменита в амфиболом, т. ан. 22; сфен – как продукт изменения ильменита, т. ан. 23. В амфиболах видна сыпь м/з ильменита, которая отражает процесс его преобразования при изменении РТ-условий и режима кислорода.

Fig. 7. Gabbrodolerite D₁-113-3a, BSE-image with points of analysis of mineral composition. Needle of apatite, which «cuts» the amphibole and intergranular plagioclase, an. point (an.) 13 and 14; small inclusion of apatite in the intergranular plagioclase, an. 21. The analyzes of other minerals: amphibole, the center of the crystal, an. 15; there a number of inclusions of fine-grained ilmenite in it, an. 17; around these inclusions amphibole changes its composition, an. 16. The composition of plagioclase in the interstices, an. 18 and 19 (№ 29, 54, respectively); one of the later generations of amphibole, an. 20; large inclusion of ilmenite in amphibole, an. 22; sphene as a product of ilmenite changes, an. 23. In amphiboles the fines of fine-grained ilmenite are visible, which reflect the process of its transformation when changing PT conditions and behaviour of oxygen.

содержание фтора (1.8–1.95 мас. %) и пониженное хлора (0.26–0.32 мас. %), при содержании серы 0.02 мас. %. Для мелких включений апатита (ан. 67 и др.) в плагиоклазе № 30–55 характерны следующие концентрации галогенов и серы: фтор 1.84–2.1 мас. %, хлор 0.36 мас. %, сера 0.10 мас. %, содержание железа 0.40–0.72 мас. %.

Амфибол в этой пробе представлен рядом ранне- и позднемагматических генераций, которые характеризуют эволюцию условий кристаллизации, от наиболее раннего высокотемпературного магнезиогастингсита (ан. 15, рис. 7) с железистостью 46 ($T_{кр}$ 950 °С, P 6.5 кбар) к более низкотемпературной (ан. 16) магнезиальной роговой обманке (с $T_{кр}$ 780–740 °С) и падением давления до 3.7–1.9 кбар, при росте железистости до 65 %. Это отражает не только снижение T и P при кристаллизации этих амфиболов, но и снижение фугитивности кислорода. На рис. 4 они образуют близкий по направлению эволюции состава тренд с амфиболами поздних габбродиоритов в составе худолазовского комплекса и амфиболами басаевского комплекса. От амфиболов в габбродиоритах худолазовского комплекса их отличает меньшее содержание железа и большее количество титана на фоне аналогичных содержаний глинозема. При этом самый ранний амфибол попадает на тренд I, характеризующий ранние этапы формирования всех исследованных типов пород в худолазовском комплексе. Этот тренд, по-видимому, в целом отражает рост флюидного давления в последовательно кристаллизующихся расплавах: от шрисгеймитов и других богатых оливином пород с медно-никелевым оруденением до поздних габбродиоритов, обогащенных ильменитом и апатитом. От этого тренда, как свидетельствуют данные рис. 4, начинается эволюция амфибола и в составе самого раннего басаевского комплекса. В связи с этим, можно предположить общий (единый) для всех комплексов Худолазовской мульды магматический мантийный (плюмовый?) источник, а все различие в составе и минерации комплексов определяется уже особенностями их фаціальных условий становления: глубиной промежуточных и других камер, различиями в P - T -условиях, составе и режиме флюидов и кислорода, соотношением во флюидах хлора, фтора и серы, возможно также интенсивностью мантийно-корового и другого взаимодействия в надсубдукционных условиях активной континентальной окраины.

Снижение содержания титана (от 4.2 мас. % TiO_2 до 2 мас. % и менее) при замещении ранних высокотитанистых амфиболов (ан. 15, см. рис. 7) более поздними менее титанистыми (ан. 16), но более железистыми амфиболами, приводит и здесь к сбросу титана в форме вторичного ильменита и лейкоксена. Последние два минерала образуют мелкокристаллические сегрегации в виде

неравномерно распределенных пятен в ранних более высокотемпературных амфиболах (см. рис. 7, т. ан. 17, 22). Ильменит такого генезиса богат оксидом титана до 54.1 мас. % и обеднен оксидом железа 42.2 мас. %, он не содержит магния и обогащен MnO 3–3.4 мас. %. Подобные сегрегации относительно позднего ильменита и лейкоксена (сфена) широко развиты в породах басаевского и в поздних габбродиоритах худолазовского комплекса. Здесь процесс замещения ранних высокотитанистых амфиболов более поздними низкотитанистыми проявлен наиболее значительно, а спад содержаний титана в поздних амфиболах наиболее существенен. На рис. 2 ильменит такого состава и генезиса занимает самую крайнюю позицию, в правой нижней части диаграммы. Он максимально обогащен титаном (TiO_2 54 мас. %), беден железом и магнием, что говорит о его относительно низкотемпературной природе.

Апатит в данной пробе обнаружен и в поздних кальцитовых сегрегациях в виде обильных мелких включений (ан. 61–65, см. табл. 1). Этот апатит характеризуется повышенным содержанием фтора 1.8–2.13 мас. %, при содержании хлора 0.30–0.38 мас. %, серы 0.06–0.10 мас. %, с содержанием стронция 0.08–0.11 мас. %, железа 0.45–0.58 мас. %. Апатит ассоциирует здесь как с кальцитом, так и с зернами обособленного ильменита и мелкозернистого амфибола. Ильменит богат марганцем 3.10 мас. % и титаном 52.6 мас. %, но беден железом 40.4–41.8 мас. % и магнием 0.06 мас. %. По составу он близок ильмениту охарактеризованному выше.

Появление поздних сегрегаций кальцита с обильными включениями апатита и ильменита в габбродолерите этого золотоносного комплекса свидетельствует об особенностях флюидного режима этих пород. Наличие в составе флюида повышенного количества углекислоты, наряду с присутствием небольшого количества хлора, серы и фтора, возможно и способствует появлению золоторудной минерализации в зальбандах даек этого комплекса.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для пород худолазовского комплекса, специализированного на $Cu-Ni$ оруденение, характерен апатит с наиболее высокими содержаниями сульфатной серы (до 0.65 мас. %), изоморфной с фосфором в составе анионного комплекса $(PO_4)^{3-}$. Этот апатит

имеет пониженное содержание фтора (< 2 мас. %), при значительном содержании (оливиновое габбро) и хлора (до 1.50 мас. %). Такой характер соотношения галогенов и серы в апатите может быть рекомендован в качестве одного из эффективных индикаторных петрологических и минералогических признаков специализации позднепалеозойских габбродолеритов Западно-Магнитогорской зоны Ю. Урала на Cu-Ni оруденение. Дополнительным критерием такой специализации будет наличие в породах сульфидных минералов, богатых медью, никелем, кобальтом. Металлогеническая специализация пород худолазовского комплекса на медно-никелевое оруденение подтверждается и геохимическими особенностями: высокими содержаниями Cr 940–1340 г/т, Ni 990–1060 г/т, Co 97–99 г/т в богатых оливином высокомагнезиальных породах, локализованных в нижних придонных частях грубо-расслоенных пикродолеритовых интрузий.

Одновременно с этим установлено усиление специализации на апатит-ильменитовое оруденение габбродиоритов одной из последних фаз худолазовского комплекса, рассекающих более ранние сульфидоносные породы. Выделены две морфологические разновидности ильменита, которые по составу практически не различаются. Одна из них представлена более крупными первично обособленными интерстициальными зернами. Другая – сегрегациями, в виде неравномерно распределенных пятен мелкокристаллического ильменита, которые образуются в процессе замещения ранних более титанистых амфиболов поздними менее титанистыми. Это при перекристаллизации первичного амфибола приводит к сбросу титана в форме позднего вторичного ильменита. Ильменит такого генезиса богат оксидами титана и марганца, но беден оксидом железа и практически не содержит магния. Подобные сегрегации позднего ильменита широко развиты и в породах басаевского и самого позднего улугуртауского комплекса.

Улугуртауский дайковый комплекс завершает базитовый магматизм в Худолазовской мульде. Контактные зоны его даек контролируют оруденение золото-кварцевого типа. Апатит в этом комплексе характеризуется умеренно повышенными содержаниями хлора 0.3–0.5 мас. %, при содержании фтора 1.5–2.1 мас. %, и относительно невысокими содержаниями серы – до 0.10 мас. %. Появление в габбродолеритах богатых апатитом поздних кальцитовых сегрегаций характеризует состав позднемагматического флюида, в котором

одновременно с хлором и небольшим количеством сульфатной серой появляется углекислота. К геохимическим особенностям пород этого комплекса относится также и наличие резкой положительной аномалии в содержаниях Pb.

Басаевский комплекс по соотношениям галогенов и серы в апатите не является металлогеническим аналогом утыкташского комплекса, с габбродиоритами которого связано небольшое по масштабам Канакайское месторождение скарново-магнетитовых руд. Этот комплекс по соотношениям галогенов и серы в апатите ближе тяготеет к худолазовскому комплексу, но имеет и свою специфику. На это указывает корреляция фтора и серы в апатите габбродолеритов, что не характерно для худолазовского комплекса.

В дайках долеритов кизильского комплекса, которые рассекают конформные тела басаевского комплекса и во времени предшествуют формированию рудоносного худолазовского комплекса, уже появляются акцессорные сульфидные минералы, обогащенные Ni, Cu, Co, As. Одни из них (более ранние) образуют включения в пироксене, другие (в том числе мышьяксодержащие) ассоциируют с поздним ильменитом, образующимся в процессе замещения раннего титанистого амфибола поздним низкотитанистым. Включения в моноклинном пироксене представлены пиритом с повышенным содержанием меди, никеля и кобальта: Ni>Cu>Co = 0.47; 0.38; 0.17 мас. %, соответственно. В ассоциации с поздним ильменитом, в краевой части его зерен, кристаллизуются очень мелкие по размерам никель- и кобальтсодержащие сульфиды: пирит с содержанием Ni>Co = 0.52; 0.36 мас. % и кобальтсодержащий герсдорфит, в котором содержание Co 12.35 мас. %. Таким образом, усиливается генетическая связь (возможно с наличием единого магматического источника) с последующим во времени рудоносным худолазовским комплексом.

Проведенный одновременно с изучением апатита анализ эволюции состава и P-T-условий кристаллизации амфиболов в породах Худолазовской мульды свидетельствует о том, что формирование самого раннего басаевского и самого позднего улугуртауского комплексов происходило при довольно резкой смене P-T-параметров кристаллизации магматических расплавов, по-видимому, в процессе их подъема к поверхности (от P 5–6 кбар до 1–2 кбар). Эти признаки неустойчивости физико-химической обстановки, быстроты кристаллизации расплавов, неравновесности составов, были, в целом, благо-

приятны для миграции флюидов в экзоконтакты интрузий и даек. В то же время, состав амфиболов в породах худолазовского комплекса свидетельствует о более стабильных (стационарных) условиях кристаллизации магматического расплава, при выдержанном Р 5–6 кбар. Такой субплатформенный режим характеризует тектоническую паузу, возникшую между предшествующими и последующими этапами аккреционно-коллизийных и трансформных сдвиго-раздвиговых деформаций. Стабильность физико-химической обстановки, длительность кристаллизации способствовали флюидно-магматическому расслоению расплава, с кумуляцией тяжелой сульфидной минерализации в придонной, обогащенной оливином, магнетитовой части пикродолеритовых интрузий, а апатит-ильменитовой минерализации в поздних более дифференцированных (габбродиориты) сериях пород.

Необходимо также отметить, что, в целом, минералогические и петрологические данные, охарактеризованные выше (близкий состав ранних амфиболов, единый тренд составов ильменита и др.), свидетельствуют о возможном генетическом родстве всех интрузивных комплексов Худолазовской мульды, по-видимому, связанных с эволюцией единого мантийного (возможно плюмового?) магматического источника. Соответственно все различия в составе и минерации комплексов Худолазовской мульды будут определяться уже особенностями их фациальных условий становления: глубиной промежуточных и других камер, различиями в РТ-условиях, составе и режиме флюидов и кислорода, соотношением во флюидах хлора, фтора и серы, возможно, также различной интенсивностью мантийно-корового и другого взаимодействия в надсубдукционных условиях активной континентальной окраины.

Типизация позднепалеозойских габброидов Западно-Магнитогорской зоны по соотношениям гадолиния и серы в апатите, кроме того, показала, что габброиды конформных интрузивных тел (утлыкташский комплекс в Имангуловской мульде и файзуллинский в Уртазымской мульде) существенно отличаются от габброидов Худолазовской мульды. Апатит этих двух комплексов сульфатную серу не содержит и выделяется повышенными содержаниями фтора (> 2 мас. %) и хлора (до 1 мас. %). Для габбродолеритов утыкташского комплекса характерно обилие Fe-Ti рудных минералов, с содержанием титаномагнетита и ильменита до 10 мас. %.

Титаномагнетит представлен рядом разновидностей, состав которых варьирует от более хромистого (2.98 мас. % Cr₂O₃) высокотитанистого (11.83 мас. % TiO₂) титаномагнетита, до сравнительно низкотитанистого (4.72 мас. % TiO₂) без хрома титаномагнетита. Ильменит богат марганцем (3.84–4.09 мас. % MnO) и относительно беден железом (FeO* 44.26–5.96 мас. %). На основании вновь полученных данных может быть сделан вывод, что конформные габбродолеритовые лополиты утыкташского комплекса, как и файзуллинского, обладают потенциальной рудоносностью (одновременно со скарново-магнетитовым оруденением) и на вкрапленное титаномагнетитовое с повышенным содержанием хрома и ильменитовое оруденение. Масштабы этого оруденения будут определяться размерами лополитов и интенсивностью процессов кристаллизационно-гравитационной дифференциации.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 15-05-00576 и проекта ФАНО и УрО РАН № 15-18-5-24.

Литература

Знаменский С.Е. Структурные условия формирования коллизийных месторождений золота восточного склона Южного Урала. Уфа: «Гилем», 2009. 348 с.

Иванов К.С. Основные черты геологической истории (1.6–0.2 млрд лет) и строения Урала. Дис. д-ра геол.-мин. наук. Екатеринбург. 1998. 252 с.

Нечухин В.М., Душин В.А., Оловянишников В.Г. Палеогеодинамические ассоциации и тектоно-геодинамические элементы Урало-Тимано-Палеоазиатского сегмента Евразии: объяснительная записка к геодинамической карте масштаба 1 : 2500000. Екатеринбург: УрО РАН; УГГУ, 2009. 158 с.

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 2010. 280 с.

Рахимов И.Р., Салихов Д.Н., Пучков В.Н., Холоднов В.В., Ронкин Ю.Л. Башкирский Sr-Nd возраст завершающей стадии коллизийного магматизма Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Доклады АН. 2014. Т. 457. № 4. С. 445–450.

Салихов Д.Н., Яркова А.В. Нижнекаменноугольный вулканизм Магнитогорского мегасинклинария. Уфа: УНЦ УрО РАН, 1992. 138 с.

Салихов Д.Н., Беликова Г.И., Пучков В.Н., Эрст Р., Холоднов В.В. и др. Никеленосный ин-

трузивный комплекс на Южном Урал // Литосфера. 2012. № 6. С. 66–72.

Салихов Д.Н., Мосейчук В.М., Холоднов В.В., Рахимов И.Р. Каменноугольный вулкано-интрузивный магматизм Магнитогорско-Богдановского грабена в свете новых геолого-геохимических данных // Литосфера. 2014. № 5. С. 33–56.

Скарново-магнетитовая формация Урала: Средний и Южный Урал. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 212 с.

Тевелев А.В., Кошелева И.А., Попов В.С., Кузнецов И.Е., Осипова Т.А., Правикова Н.В., Густова А.С. Палеозойды зоны сочленения Восточного Урала и Зауралья / Тр. лабор. геологии складчатых поясов (вып. 4). М.: Геологический ф-т МГУ, 2006. 300 с.

Ферштатер Г.Б. Магнитогорская габбро-гранитная интрузия. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1966. 143 с.

Ферштатер Г.Б. Петрология главных интрузивных ассоциаций. М.: Наука, 1987. 232 с.

Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Прибавкин С.В., Бородин Н.С., Бочарникова Т.Д. Рифтогенный магматизм и оруденение Южного Урала // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 5. С. 421–443.

Холоднов В.В., Бочарникова Т.Д. Режим галогенов и эволюция крупных железоносных рудно-магматических центров в условиях надсубдукционного рифтогенеза (Магнитогорская мегазона, Ю. Урал) // Эндеогенное оруденение в подвижных поясах (XIII Чтения памяти А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 79–83.

Холоднов В.В., Бушляков И.Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург. 2002. 390 с.

Язева Р.Г., Бочкарев В.В. Геология и геодинамика Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1998. 203 с.

Hammarstrom J.M., Zen E-An. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer // American Mineralogist. 1986. V. 71. № 11/12. P. 1297–1313.

Otten M.T. The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1984. V. 86. P. 189–199.

Поступила в редакцию 25 июня 2015 г.