

## ГАЛОГЕНЫ И СЕРА В ГИДРОКСИЛСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛАХ ВОСТОЧНО-ВЕРХОТУРСКОГО ДИОРИТ-ГРАНОДИОРИТОВОГО МАССИВА С МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ В ВИДЕ САМОРОДНОЙ МЕДИ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

© 2018 г. А. В. Коровко, В. В. Холоднов, С. В. Прибавкин,  
Е. В. Коновалова, А. В. Михеева

В статье кратко рассмотрены данные, характеризующие распределение содержания основных элементов-минерализаторов F, Cl, S в сосуществующих апатитах, роговых обманках и биотитах диоритов и гранодиоритов, слагающих основную часть Восточно-Верхотурского массива, и диоритов секущих их даек. Установлено, что соотношения содержания S и Cl в апатитах интрузивных пород Восточно-Верхотурского массива наиболее близки к составам апатитов надсубдукционных диорит-гранодиорит-порфировых комплексов, сопровождающихся золото-медно-порфировым и медно-молибден-порфировым оруденением. На основании результатов исследований сделан также предварительный вывод, что пониженное содержание сульфатной серы в апатитах из дайки диоритов, рассекающей интрузивные породы, может свидетельствовать о снижении окислительного потенциала на завершающем этапе формирования Восточно-Верхотурского массива. В связи с этим предполагается, что рост восстановительного режима флюида мог быть благоприятным фактором для формирования наложенной на эти интрузивные породы минерализации в виде самородной меди. Предложена новая тройная диаграмма распределений F–Cl–S в апатитах (с применением корректирующих коэффициентов), которая в дальнейшем может быть использована для разработки и “калибровки” различных генетических, геодинамических, формационных и возрастных реконструкций и предварительной оценки рудоперспективности различных по составу магматических комплексов.

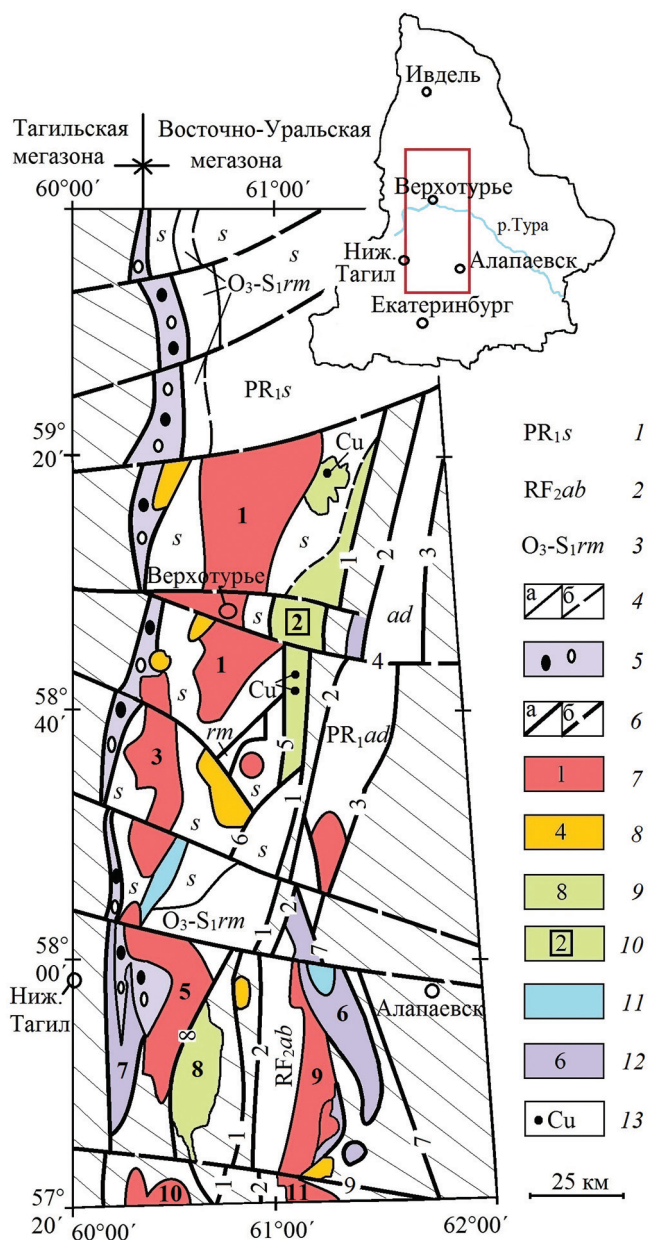
### ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемые в работе диоритоиды Восточно-Верхотурского габбро-диорит-гранодиоритового массива (25 км к востоку от г. Верхотурье) несут медную минерализацию, выявленную в процессе геолого-съёмочных работ [Лагутенко и др., 1974], представленную невыдержанными по мощности зонами развития самородной меди неясного генезиса в виде рассеянной тонко-мелкозернистой вкрапленности чешуек, пластинок, зерен, пленок. Масштабы медной минерализации неизвестны. Массив практически не обнажен и слабо изучен. С геологической точки зрения он расположен в самой восточной части Верхотурско-Исетской подзоны Верхотурско-Новоуренбургской структурно-формационной зоны (СФЗ) Восточно-Уральской мегазоны. Массив протягивается в субмеридиональном направлении на 100 км (рис. 1). Ширина массива в его средней части (в долине р. Тура) достигает 14 км. С востока массив ограничен региональным Верхисетским сбросо-сдвигом крутого западного падения, зона которого отделяет его от образований девона и карбона Медведевско-Арамилской подзоны СФЗ. В южной части массив имеет тектонические контакты с метаморфитами салдинской свиты нижнего протерозоя и ограничен разломами: на юго-востоке – Карповским крутого СЗ падения, на западе – субвертикальным Бро-

довским. В средней части массив осложнен зоной широтного Туринского глубинного крутопадающего разлома, разделяющей его на две половины: южную – север-северо-западного и северную – север-северо-восточного простираний, чем обусловлена общая флексуроподобная S-образная форма массива в плане.

Породы массива принадлежат калиево-натриевой известково-щелочной серии нормальной щелочности, преобладают диориты, гранодиориты, реже развиты габбро и граниты. Изотопные и геохимические данные [Коровко и др., 2018] подтверждают образование массива в среднем карбоне (U–Pb возраст цирконов, определенный методом лазерной абляции, составляет  $339.0 \pm 2.8$  млн лет) в надсубдукционной обстановке активной континентальной окраины. Более подробно положение массива, особенности его строения, специфика минерального, петро- и геохимического состава, возраст рассмотрены в работе [Коровко и др., 2018].

В этой статье рассмотрены впервые полученные данные о характере распределения содержания основных элементов-минерализаторов F, Cl, S в сосуществующих апатитах, роговых обманках и биотитах диоритов и гранодиоритов, слагающих основную часть Восточно-Верхотурского массива, а также диоритов секущих их даек. Анализ этих данных позволит более корректно не только реконструировать геодинамические обстановки, условия



**Рис. 1.** Схема местоположения Восточно-Верхотурского диоритоидного массива [Государственная геологическая карта..., 2011 с дополнениями].

1–3 – стратифицированные высокометаморфизованные образования: 1 – салдинской (PR<sub>1s</sub>) и адуьской (RF<sub>2ab</sub>) свит нижнего протерозоя, 2 – алабашской свиты среднего рифея, 3 – ромашинской толщи; 4 – границы разновозрастных образований; 5 – полимиктовый серпентинитовый меланж зоны Серовско-Маукского разлома; 6 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б) (1 – Верхисетский, 2 – Мурзинский, 3 – Сосьвинский, 4 – Туринский, 5 – Боровской, 6 – Карповский, 7 – Мелкозеровский, 8 – Краснопольский, 9 – Режевской); 7–12 – массивы преимущественно: 7 – гранитоидные (1 – Верхотурский, 3 – Телянский, 5 – Краснопольский, 6 – Мурзинский, 10 – Верхисетский, 11 – Адуьский), 8 – сиенитоидные (4 – Басьяновский), 9 – диорит-гранодиоритовые (2 – Восточно-Верхотурский,

8 – Петрокаменский), 10 – Восточно-Верхотурский, 11 – габброидные, 12 – ультраосновные (6 – Алапаевский, 7 – Восточно-Тагильский); 13 – основные пункты встречи зон развития самородной меди. Штриховкой обозначены нерасчлененные образования палеозоя.

и флюидный режим проявления интрузивного магматизма, но и установить генетические, пространственные и временные связи формирования приуроченного к магматитам оруденения.

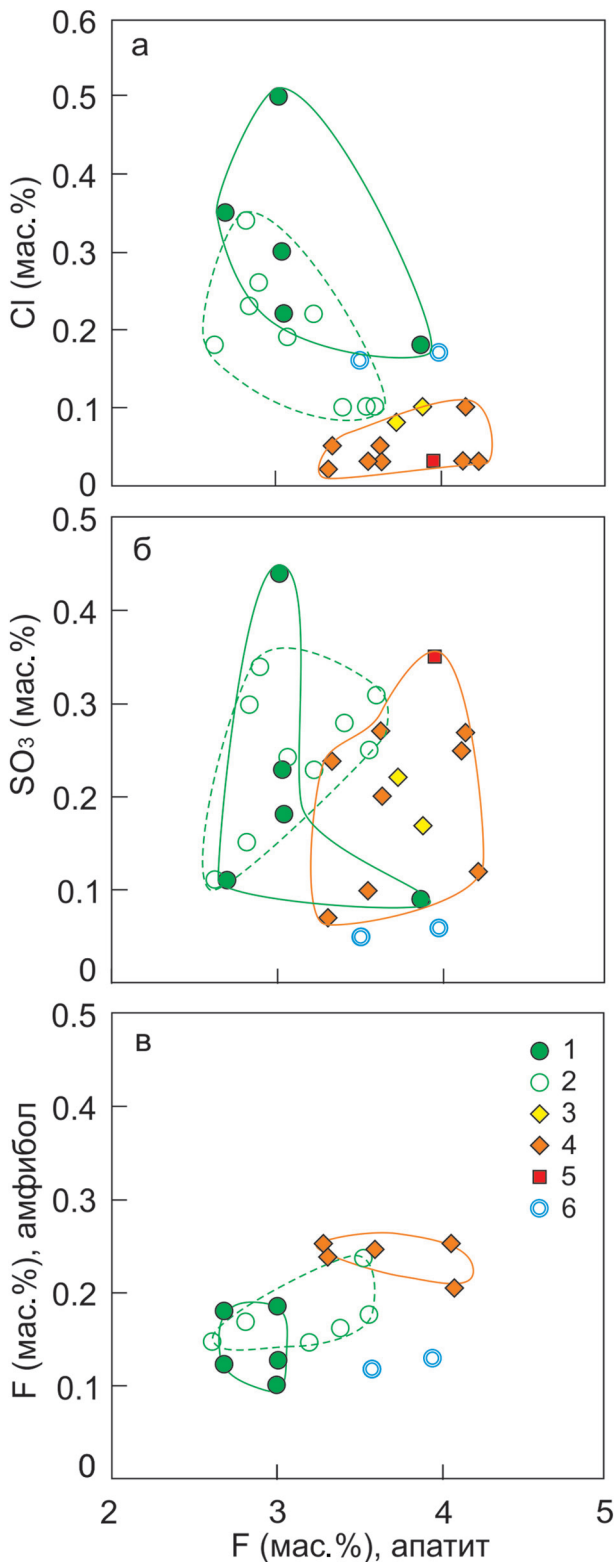
### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В полированных шлифах пород массива, содержащих и не содержащих самородную медь, проанализированы первично магматические апатиты, находящиеся как в виде включений в зернах роговых обманок и биотитов, так и в межзерновом пространстве преимущественно полевошпатового состава. Также проанализированы амфиболы и биотиты. Определение химического состава минералов и содержания в них галогенов, серы, выполнено на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX 100 в ЦКП “Геоаналитик” по стандартной методике (аналитик А.В. Михеева). Пределы обнаружения по сере и хлору составляют 0.02 мас. %, фтору – 0.10 мас. %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для состава апатитов пород массива характерно общее резкое преобладание содержания F над концентрацией Cl и S с наличием общего четкого тренда возрастания концентрации F от 2.6 до 4.2 мас. % при снижении концентрации Cl от 0.4 до 0.0 мас. % (рис. 2а). Эта эволюция в составе апатитов проявляется при снижении основности пород от диоритов к гранодиоритам и при возрастании в них содержания K<sub>2</sub>O (табл. 1). Она же прослеживается и внутри каждого образца породы, когда от ранних кристаллов апатита (зерен, заключенных в амфиболе) к поздним (заключенным в кварц-полевошпатовом базисе, т. е. остаточном расплаве) увеличивается концентрация F и снижается – Cl.

Концентрации серы (SO<sub>3</sub>) варьируют в диапазоне 0.10–0.45 мас. % и находятся примерно на одном уровне в породах разной основности, за исключением поздней дайки диорита, в апатите которой сера отсутствует. Наиболее четко проявлена положительная корреляция значений содержания серы и натрия в соответствии с гетеровалентным изоморфизмом Na<sup>+</sup> + P<sup>5+</sup> = S<sup>6+</sup> + вакансия. Корреляция между величинами содержания F и S в апатитах не очевидна (рис. 2б). Тем не менее отмечается тенденция снижения содержания S от ранних кристаллов к поздним, подмеченная на многих объектах и подтвержденная экспериментальными данными, связываемая с трендом понижения температуры расплава.



**Рис. 2.** Соотношения содержания в апатитах F–Cl (а), F–SO<sub>3</sub> (б) и F в апатитах и сосуществующих роговых обманках (в).

Здесь и на рис. 3: 1 – диорит, обр. 16/63.5; 2 – кварцевый диорит, обр. 21/117; 3–5 – гранодиориты: 3 – обр. 23/71.4, 4 – обр. 17/57.5, 5 – обр. 6/93.5; 6 – диорит, обр. 16/63.5-1, дайка (см. табл. 1).

Содержание F в амфиболах и биотитах низко (табл. 2) и не превышает 0.50 мас. % F в слюде и 0.25 – в амфиболе. Концентрация Cl не превышает 0.10 мас. %, а уровни их содержаний в биотитах и амфиболах близки. Соотношение содержаний F между сосуществующими апатитами и темноцветными гидроксилсодержащими минералами характеризуется положительной корреляцией (рис. 2в) при понижении основности пород от диоритов к гранодиоритам. На фоне общей тенденции повышения уровней концентрации F в сосуществующих апатитах и темноцветных минералах намечается некоторая дискретность их концентрации в диоритах и гранодиоритах (рис. 2, 3).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе кристаллизации пород массива от диоритов к кварцевым диоритам ранней фазы к гранодиоритам поздней фазы содержание Cl в апатитах закономерно снижается на фоне возрастания содержания F. Это свидетельствует о накоплении фтора в остаточных кремнекислых расплавах и отделению хлора во флюидную фазу [Холоднов, Бушляков, 2002; и др.].

Поведение S в истории кристаллизации пород массива не так очевидно. Тем не менее некоторая закономерность, о чем сказано ранее, прослеживается. В целом соотношения содержаний S и Cl в апатитах интрузивных пород Восточно-Верхотурского массива наиболее близки к составам апатитов надсубдукционных диорит-гранодиоритовых комплексов, сопровождающихся золото-медно-пофировым и медно-молибден-порфировым оруденением [Холоднов, Бушляков, 2002; и др.]. Однако в отличие от последних изученные апатиты имеют существенно более высокую концентрацию F. Возможно, это связано с наличием в фундаменте Верхотурско-Исетской зоны блоков древней континентальной коры сиалического состава. По соотношениям значений содержания F и Cl в роговых обманках и биотитах и по распределениям содержаний Cl между апатитами, роговыми обманками и биотитами образования Восточно-Верхотурского массива более близки к гранитоидам Забайкалья, которые сопровождаются сульфидно-полиметаллическим оруденением гидротермального типа [Холоднов, Бушляков, 2002]. В то же время по соотношениям содержаний F, Cl, S апатиты Восточно-Верхотурского массива заметно отличаются от апатитов мантийно-корковых окраинно-континентальных комплексов габбро-тоналит-гранодиорит-гранитового типа (Верхисетский, Шарташский, Челябинский, Каменский и другие массивы), сопровождающихся золото-сульфидно-кварцевой минерализацией (см. рис. 3).



**Таблица 1.** Химические составы апатитов пород Восточно-Верхотурского массива (мас. %)

№ обр. Порода	Позиция апатита	Точка	CaO	SrO	MnO	FeO	MgO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	F	Cl	Сумма
16/63,5 Диорит SiO <sub>2</sub> – 53.97 K <sub>2</sub> O – 1.19	Амф	4-18	57.34	0.12	0.06	0.40	0.01	0.05	40.73	0.06	0.11	2.70	0.35	100.70
	Амф	1-76	57.92	0.09	0.13	0.31	0.03	0.06	39.94	0.21	0.23	3.04	0.30	100.92
	Амф	2-59	57.23	0.10	0.13	0.24	0.01	0.12	39.95	0.23	0.44	3.02	0.50	100.58
	Кв-ПШ	3-10	58.70	0.07	0.00	0.28	0.00	0.09	39.06	0.18	0.18	3.05	0.22	100.49
	Кв-ПШ	6-39a	56.73	0.00	0.07	0.24	0.02	0.00	41.19	0.09	0.09	3.88	0.18	100.78
21/117 Кварцевый диорит SiO <sub>2</sub> – 62.41 K <sub>2</sub> O – 2.32	Амф	1-7-1	57.07	0.00	0.04	0.25	0.00	0.05	40.10	0.26	0.28	3.41	0.10	100.15
	Амф	1-7-2	57.45	0.00	0.02	0.24	0.00	0.07	40.29	0.20	0.31	3.60	0.10	100.82
	Амф	1-7-3	57.40	0.00	0.08	0.22	0.03	0.07	40.60	0.20	0.23	3.23	0.22	100.88
	Амф	3-136	57.00	0.00	0.04	0.42	0.00	0.03	40.92	0.23	0.24	3.07	0.19	100.82
	Бт	3-13г	56.70	0.00	0.00	0.12	0.01	0.04	41.82	0.29	0.30	2.84	0.23	100.81
	Амф	4-226	56.61	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	41.30	0.69	0.15	2.82	0.34	100.67
	Амф	5-33	55.48	0.05	0.04	0.31	0.04	0.06	41.67	0.25	0.25	3.56	0.10	100.33
	Амф	4-28в	56.86	0.00	0.12	0.04	0.03	0.05	41.36	0.21	0.34	2.90	0.26	100.89
Амф	6-44a	56.23	0.00	0.06	0.08	0.01	0.00	42.04	0.35	0.11	2.63	0.18	100.55	
23/71,4 Гранодиорит SiO <sub>2</sub> – 63.37 K <sub>2</sub> O – 2.29	Кв-ПШ	2-4	57.52	0.07	0.08	0.11	0.00	0.08	40.02	0.25	0.17	3.89	0.10	100.64
	Кв-ПШ	2-8	56.56	0.03	0.06	0.05	0.01	0.16	40.68	0.31	0.44	3.38	0.23	100.45
	Кв-ПШ	2-9	56.93	0.05	0.08	0.57	0.00	0.01	40.36	0.19	0.22	3.73	0.08	100.62
17/57,5 Гранодиорит SiO <sub>2</sub> – 63.91 K <sub>2</sub> O – 2.23	Амф	1-50	56.51	0.04	0.07	0.18	0.00	0.11	41.22	0.17	0.24	3.34	0.05	100.50
	Амф	1-50a	56.76	0.13	0.06	0.43	0.02	0.14	39.68	0.22	0.27	4.15	0.10	100.19
	Бт	3-67	57.47	0.03	0.14	0.15	0.00	0.00	39.79	0.14	0.12	4.23	0.03	100.35
	Бт	3-67a	59.04	0.00	0.03	0.21	0.00	0.00	38.76	0.15	0.10	3.56	0.03	100.39
	Амф	4-77	56.79	0.02	0.03	0.11	0.01	0.06	40.28	0.18	0.25	4.13	0.03	100.15
	Амф	4-77a	58.29	0.07	0.09	0.21	0.01	0.00	39.21	0.23	0.27	3.63	0.05	100.54
	Амф	5-88г	57.58	0.01	0.03	0.07	0.00	0.00	40.37	0.20	0.20	3.64	0.03	100.60
	Амф	6-88в	58.04	0.03	0.00	0.26	0.00	0.00	40.01	0.24	0.07	3.32	0.00	100.60
6/93,5 Гранодиорит SiO <sub>2</sub> – 64.80 K <sub>2</sub> O – 2.61	Амф	6-29	56.89	0.05	0.09	0.14	0.00	0.08	40.02	0.40	0.35	3.96	0.03	100.34
16/63,5-1 Диорит/дайка SiO <sub>2</sub> – 54.50 K <sub>2</sub> O – 0.96	Амф	5-29	57.83	0.08	0.09	0.16	0.01	0.07	39.85	0.08	0.05	3.51	0.16	100.38
	Амф	5-29-1	57.40	0.00	0.08	0.16	0.02	0.00	41.79	0.07	0.06	3.99	0.17	102.01

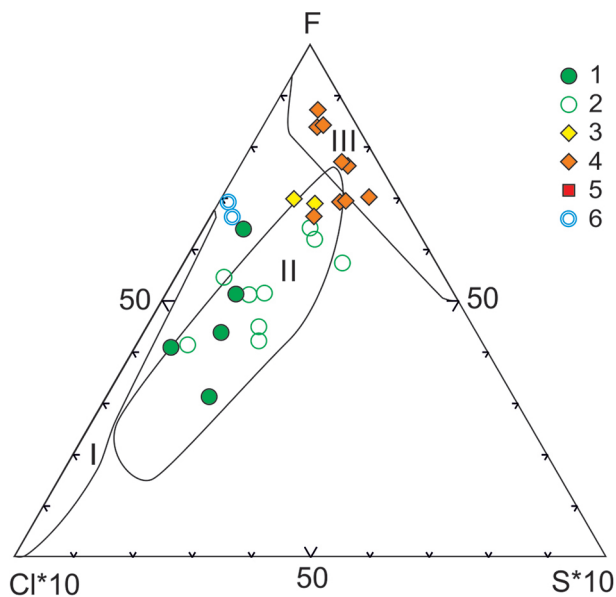
Примечание. SiO<sub>2</sub> и K<sub>2</sub>O – содержание в породе (мас. %). Включения апатита: в амфиболе (Амф), биотите (Бт), кварц-полевошпатовом агрегате (Кв-ПШ).

На основании результатов исследований можно сделать предварительный вывод, что пониженное содержание серы в апатитах диоритов даек, по-видимому, может свидетельствовать о снижении окислительного потенциала кислорода на завершающем этапе формирования Восточно-Верхотурского массива. В связи с этим можно предположить, что рост восстановительного режима флюида мог быть благоприятным фактором для формирования наложенной на эти интрузивные породы минерализации самородной меди. Источником меди могли быть сами интрузивные породы с повышенной концентрацией меди (32–262 г/т). Это предварительное предположение в дальнейшем потребует более детальных исследований по установлению природы, масштабов и условий формирования рассеянной минерализации самородной меди в породах Восточно-Верхотурского массива.

В заключение необходимо отметить, что изучению состава апатитов и содержанию в них галогенов и серы как элементов-индикаторов и элементов-минерализаторов в генетическом и формационном плане уделялось и уделяется большое внимание, но в публикациях одновременно фактически не рассматривался вопрос об уровне концентрации и характере соотношений F, Cl и S в апатитах из-за их резко различных (до первого порядка) содержаний. На основе данных о контрастности и вариативности содержания галогенов и серы в апатитах из разновозрастных и разноформационных магматических и сопровождающих их рудно-метасоматических образованиях, установленных ранее [Холоднов, Бушляков, 2002; Ферштатер и др., 2010; Авдонина и др., 2012; Грабежев и др., 2012; Холоднов и др., 2013; Коновалова и др., 2013; Петров и др., 2017; и др.] и полученных нами, предла-

**Таблица 2.** Вариации содержаний галогенов и серы в апатитах, роговых обманках и биотитах пород Восточно-Верхотурского массива

№ обр. Порода	Минерал	Содержание (мас. %)		
		F	Cl	S
16/63,5 Диорит SiO <sub>2</sub> – 53.97 K <sub>2</sub> O – 1.19	Апатит	2.70–3.88	0.18–0.50	0.04–0.18
	Амфибол	0.09–0.25	0.00–0.05	0.00–0.04
21/117 Кварцевый диорит SiO <sub>2</sub> – 62.41 K <sub>2</sub> O – 2.32	Апатит	2.63–3.60	0.10–0.34	0.04–0.17
	Амфибол	0.12–0.23	0.03–0.09	0.00–0.00
	Биотит	0.24–0.33	0.05–0.10	0.00–0.00
17/57,5 Гранодиорит SiO <sub>2</sub> – 63.91 K <sub>2</sub> O – 2.23	Апатит	3.32–4.23	0.00–0.10	0.03–0.11
	Амфибол	0.12–0.25	0.04–0.09	0.00–0.00
	Биотит	0.41–0.50	0.00–0.04	0.00–0.03
6/93,5 Гранодиорит SiO <sub>2</sub> – 64.80 K <sub>2</sub> O – 2.61	Апатит	3.96	0.03	0.14
	Амфибол	0.21–0.24	0.03–0.08	0.00–0.03
	Биотит	0.36–0.43	0.03–0.05	0.00–0.00
16/63,5-1 Диорит (дайка) SiO <sub>2</sub> – 54.50 K <sub>2</sub> O – 0.96	Апатит	3.51–3.99	0.16–0.17	0.00–0.00
	Амфибол	0.09–0.18	0.03–0.05	0.00–0.00

**Рис. 3.** Соотношения содержания в апатитах F–Cl–S.

Поля соотношений содержания F, Cl и S в апатитах пород интрузивных комплексов, специализированных на оруденение: I – титаномагнетитовое и скарново-магнетитовое (магнитогорский, помурский комплексы и др.), II – медно-порфировое, Южный Урал, III – золото-сульфидно-кварцевое и золото-редкометалльное.

гается новая классификационная диаграмма соотношения содержаний F, Cl и S в апатитах магмати-

ческих пород (см. рис. 3). Она может быть использована для дальнейшей разработки и “калибровки” различных генетических, геодинамических, формационных и возрастных реконструкций и предварительных оценок рудоперспективности магматических комплексов.

*Работа выполнена в рамках темы № АААА-А18-118052590034-0 государственного задания ИГГ УрО РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Авдонина И.С., Прибавкин С.В., Замятин Д.А.* Апатит и ангидрит в субвулканических трахиандезитах и трахидацитах (Средний Урал) // Ежегодник-2011. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 159. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. С. 129–133.

Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1 : 1 000 000. 3-е поколение. Серия Уральская. Л. О-41. Екатеринбург. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 492 с.

*Грабежжев А.И., Воронина Л.К.* Сера в апатите из пород медно-порфировых систем Урала // Ежегодник-2011. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 159. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. С. 68–70.

*Коновалова Е.В., Прибавкин С.В., Замятин Д.А., Холоднов В.В.* Элементы-минерализаторы (сера и галогены) в апатитах Шарташского массива и Березовского золоторудного месторождения // Литосфера. 2013. № 6. С. 65–72.

*Коровко А.В., Бородин Н.С., Вишнякова М.Д., Зайцева М.В., Парфенов В.В.* Восточно-Верхотурский габбро-диорит-гранодиоритовый массив (Средний Урал): новые данные по составу, условиям формирования, возрасту и металлогении // Изв. УГГУ. 2018. Вып. 3, № 51. С. 54–62.

*Лагутенко В.Н. и др.* Геологическая карта масштаба 1 : 50 000. Л. О-41-39-В, Г. Отчет Юконского отряда о глубинном геологическом картировании масштаба 1 : 50 000 Юконской площади. Свердловск: УГСЭ, 1974. 289 с.

*Петров Г.А., Холоднов В.В., Останин С.Ю., Шагалов Е.С., Коновалова Е.В.* Флюидный режим формирования и особенности металлогении гранитоидов Южно-Помурского массива (Северный Урал) // Литосфера. 2017. № 5. С. 109–112.

*Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Кременецкий А.А. и др.* Золотоносные габбро-тоналит-гранодиорит-гранитные массивы Урала: возраст, геохимия, особенности магматической и рудной эволюции // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52, № 1. С. 65–84.

*Холоднов В.В., Бушляков И.Н.* Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 394 с.

*Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Коновалова Е.В., Замятин Д.А., Салихов Д.Н.* Флюидные элементы-минерализаторы (галогены и сера) при эволюции состава и потенциальной рудоносности крупного Ахуново-Петропавловского ареала орогенного гранитоидного магматизма на севере Магнитогорской мегазоны // Ежегодник-2012. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2013. С. 129–133.