

ПЕРВАЯ НАХОДКА ГОЯЦИТА В ДОЛОМИТ-КВАРЦЕВЫХ ЖИЛАХ БЕРЕЗОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

С. Г. Суставов, Д. А. Ханин, Е. С. Шагалов

The first discovery of goyazite in dolomite-quartz veins of Berezovsky gold deposit

S. G. Sustavov, D. A. Khanin, E. S. Shagalov

The subject of study is a rare primary phosphate of strontium and aluminum – goyazite. Currently, in the Urals there are several findings of this mineral, which in varying degrees characterize this rare strontium phosphate. The paper contains a detailed description of the first discovered goyazite at the Berezovsky gold deposit. Flattened rhombohedral crystals of pinkish-red goyazite are growing on quartz crystals with the formation of induction surfaces of shared growth. Grains of goyazite occur as chains in beresites in the form of small chains. In the description of morphology, authors described in detail the simple forms that developed on the crystals, and their sculpture. The study of the chemical composition of the mineral showed that along with the main goyazite mineral, there are impurity minerals present – svanbergite and crandallite. In the related dolomite authors established typomorphic particulars of the chemical composition, reflecting the influence of surrounding rocks. Diffraction study shows that the exact diagnostics of the minerals in the group is possible only if their chemical composition is available. Authors calculated the parameters of elementary cell of the mineral and identified their specific parameters. All discoveries of previously found goyazite are confined to terrigenous rocks, greisens, pegmatites and carbonatites. This is the first occurrence of the mineral in hydrothermal gold deposit. The interrelation with the minerals surrounding goyazite shows its formation of the final stages of a second, quartz-pyrite mineral assemblage. Local and weak development of goyazite in quartz-dolomite veins, apparently, is due to the low content of strontium in the enclosing volcanic and sedimentary rocks, from which it was retrieved later by hydrothermal solutions. The work will serve to clarify the mineralogy and geochemistry of the classical gold deposit of the Urals.

Keywords: Berezovsky gold deposit; strontium and aluminum phosphate; goyazite; crandallite; svanbergite; beresite; dolomite-quartz vein; diffraction study; unit cell parameters.

Предметом исследования является редкий основной фосфат стронция и алюминия – го-яцит. В настоящее время на Урале известно несколько находок этого минерала, которые в разной степени характеризуют этот редкий фосфат стронция. Работа посвящена де-тальному описанию впервые найденного на Березовском золоторудном месторождении го-яцита. Уплотненные ромбоэдрические кристаллы розовато-красного го-яцита нара-стают на кристаллы кварца с образованием индукционных поверхностей совместного роста. Зерна го-яцита встречаются в березитах в виде мелких цепочек. При описании морфологии детально охарактеризованы простые формы, развитые на кристаллах, и их скульптура. Изучение химического состава минерала показало, что наряду с основным го-яцитом в минерале присутствуют сванбергитовый и крандаллитовые примесные ми-нералы. В сопутствующем доломите установлены типоморфные особенности химического состава, отражающие влияние окружающих пород. Дифракционное исследование по-казывает, что точная диагностика минералов в группе возможна только при наличии их химического состава. Рассчитаны параметры элементарной ячейки минерала и выявлены их специфические особенности. Все находки ранее найденного го-яцита приурочены к терригенным породам, грейzenам, пегматитам и карбонатитам. В гидротермальном зо-лоторудном месторождении минерал установлен впервые. Взаимоотношение с окру-жающими го-яцит минералами показывает образование его на заключительных этапах вто-рой, кварц-пиритовой минеральной ассоциации. Локальное и слабое развитие го-яцита в кварц-доломитовых жилах связано, по-видимому, с убогим содержанием стронция во вмещающих вулканогенно-осадочных породах, из которых он извлекался в последующем гидротермальными растворами. Работа послужит для уточнения минералогии и геохимии классического золоторудного месторождения Урала.

Ключевые слова: Березовское золоторудное месторождение; фосфат стронция и алюминия; го-яцит; крандаллит; сванбергит; березит; доломит-кварцевая жила; дифракционное исследование; параметры элементарной ячейки.

Впервые го-яцит $\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$ был най-ден в алмазоносных галечниках провинции Гойяс в Бразилии в конце XIX в. и получил свое название по месту первой находки [1]. В группе пльумбогуммита, к которой относится го-яцит, присутствуют близкие по составу горсейксит $\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$, крандаллит $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$ и сванбергит $\text{SrAl}_3(\text{SO}_4)(\text{PO}_4)(\text{OH})_6$, принадлежащие к структур-ному типу алунита [2]. Позицию стронция изоморфно могут занимать барий, кальций и легкие редкоземельные элементы. Находки го-яцита приурочены к разным геологическим услови-ям – от терригенных пород, где он впервые был найден, до кар-бонатитов, грейzenов и пегматитов [1, 3].

На Урале го-яцит впервые был установлен Н. В. Рентгартеном в нижнемеловых белковых отложениях Троицко-Байновского ме-сторождения каолиновых глин. Позднее был описан в друзовой полости гранитного пегматита топазовой копи М. П. Мельникова в Ильменских горах [4, 5]. В последнее время находки этого достаточ-

но редкого минерала участились [6].

Березовское золоторудное месторождение является классиче-ским объектом кварцево-жильного типа. Кварцевые жилы месторо-ждения подразделяются на три формации: шеелитоносную (кварцево-турмалиновую), золотоносную (кварцево-карбонатно-сульфидную) и пиррофиллитсодержащую (пиррофиллит-турмалин-кварцевую). Жилы первой и второй формации имеют в пределах месторождения зональное распределение. Внутри зон в жилах развиты различные минеральные ассоциации: анкерит-кварцевая, кварц-пиритовая, по-лиметаллическая и карбонатная [7].

При изучении коллекции из Березовского месторожде-ния, собранной начальником Центральной шахты Владимиром Ивановичем Коваленко, был встречен образец березита, рассе-ченный кварцевым прожилком. Совместно с единичными кри-сталлами кварца в прожилке отмечаются кристаллы зеленова-то-желтого доломита. Наряду с основными минералами в жиле встречаются кристаллики го-яцита и пирита. Вкрапленность пентагондодекаэдрических кристалликов пирита размером от 0,2–0,3 мм до 1 мм присутствует также в березите.

Кварц в жиле представлен длиннопризматическими вода-нопрозрачными кристалликами, наиболее крупные из них до-стигают в длину 12–15 мм, в поперечном сечении 4–6 мм. В огра-нении присутствуют грани гексагональной призмы и основных положительного и отрицательного ромбоэдров. На гранях гек-сагональной призмы наблюдается грубая горизонтальная штри-ховка. В основании крупных кристаллов кварца наблюдаются облачные включения тонкочешуйчатого серицита и единичные включения кристалликов пирита.

Го-яцит в виде уплотненных ромбоэдрических кристаллов нара-стает и частично врастает во внешние зоны индивидов кварца. На грани ромбоэдра кристалла кварца видны индукционные поверх-ности от выпавших индивидов го-яцита. В ограничении кристаллов присутствуют грани следующих простых форм: ромбоэдра $r\{10\bar{1}2\}$, $f\{01\bar{1}1\}$, $n\{20\bar{2}1\}$ и пинакоида $c\{0001\}$ (рис. 1). Наибольшее развитие на кристаллах имеют грани ромбоэдра r и базопинакоида. Облик кристаллов близок к изометричному, несколько уплощен в базальной плоскости. Грани ромбоэдра f развиты незначительно и притупляют боковые вершины кристаллов в виде небольших пря-моугольных или шестиугольных плоскостей.

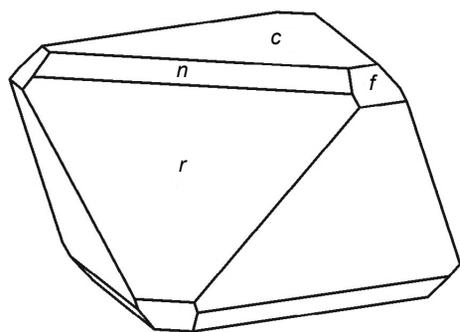


Рисунок 1. Форма кристалла гояцита.

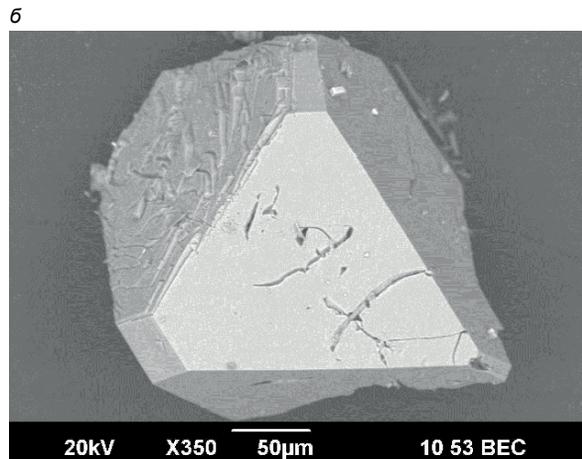
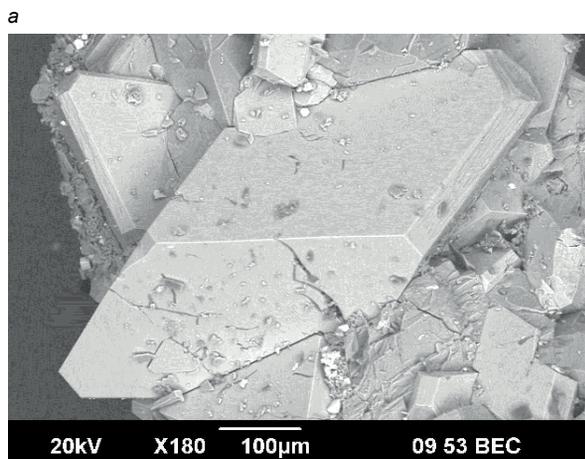


Рисунок 2. Кристаллы гояцита. а – нарастание искаженного кристалла гояцита на кварц и срастание с доломитом; б – дефекты граней монокристалла гояцита. РЭМ-фото в отраженных электронах (прибор JSM-6390LV).

Грани ромбоэдра *n* развиты не на всех кристаллах. Они обычно присутствуют в виде узких прямоугольных плоскостей, притупляющих ребро между гранями ромбоэдра *r* и пинакоида *c*. Неравномерное развитие простых форм на кристаллах гояцита приводит к четко выраженному удлинению некоторых кристаллов (рис. 2, а). Грани их наименее совершенны и покрыты тонкой комбинационной штриховкой. Крупные грани кристаллов гояцита содержат серповидные, щелевидные, слегка изогнутые полости, похожие на трещины разрыва, образование которых не совсем понятно, так как они не продолжают на соседние грани (рис. 2, а, б). Возможно, они связаны с напряжениями, возникающими в растущем кристалле.

Грани кристаллов гояцита часто покрыты мелкими обломками кварца, пирита и чешуек слюды. Это свидетельствует о тектонических подвижках сразу после образования минералов в жиле и дробления их в призальбандовых областях. Кристал-

лы гояцита нарастают на кристаллы кварца закономерно, подчеркивая ориентировку зальбандов жилы относительно силы тяжести. Индивиды гояцита прозрачны и имеют розовато-красную окраску. Наряду с кристаллами в призальбандовой части жилы в березите наблюдается вкрапленность зерен гояцита в виде коротких цепочек, иногда пересекающихся. Доломит в жиле встречается двух типов. Первый – это мелкие бесцветные ромбоэдрические кристаллики, нарастающие на кварц и гояцит (рис. 3). Размер их не превышает 1 мм в поперечнике. В большинстве из них во внешней зоне кристалла наблюдается рассеянная вкрапленность пылевидного пирита. Кристаллы

второго типа имеют зеленовато-желтую окраску. Представлены расщепленными, слегка изогнутыми ромбоэдрическими индивидами, образующими субпараллельные срастания. Грани подобных сростков, достигающие 1 см в поперечнике, обращенные в сторону себе подобных, имеют блочно-ромбоэдрическое строение. Размеры отдельных блоков при этом достигают 0,5–1,0 мм. Кристаллы второго типа, как правило, ориентированы осями второго порядка перпендикулярно к зальбанду жилы, что придает подобным сросткам кристаллов гребенчатую форму. На сколах кристаллов второго типа видно, что их окраска зональная, внутренние зоны белые, внешние зеленовато-желтые. В приповерхностных частях кристаллов второго типа наблюдаются включения мелкодробленого пирита. В основании некоторых из них встречаются единичные включения кристаллов гояцита.

Химический состав гояцита (табл. 1) изучен на кафедре минералогии геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова на электронно-зондовом микроанализаторе Camebax SX 50 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе накала 30 мА (аналитик Д. А. Ханин). При определении состава гояцита и доломита использовались следующие стандарты: доломит: Mg – TILZ (тилазит); Ca – кальцит; Mn, Fe – (Mn, Fe)CO₃; Sr – SrSO₄; Y – YPO₄; Ba – BaSO₄; La – LaPO₄; Ce – CePO₄; Pr – PrPO₄; Nd – NdPO₄; Sm – SmPO₄; Eu – EuPO₄; Gd – GdPO₄; для гояцита: Na – CHKL (чкаловит); Mg – TILZ; Al, Cr – SPL (шпинель); P – KTiPO₅; S – BaSO₄; Ca – кальцит; Mn, Fe – (Mn, Fe)CO₃; Sr – SrSO₄; Y – YPO₄; La – LaPO₄; Pr – PrPO₄; Ce – CePO₄; Nd – NdPO₄; Sm – SmPO₄; Pb – VAN (ванадинит). Анализ гояцита выполнен с площадки 10 × 10 мкм в связи с неустойчивостью его в пучке.

Проведенный анализ минерала показывает, что в нем наряду с гояцитовым миналом, который является основным, присутствуют также сванбергитовый и крандаллитовый миналы. Наряду с этим химический состав гояцита осложнен примесями легких редких земель, содержание которых обычно не превышает 0,22

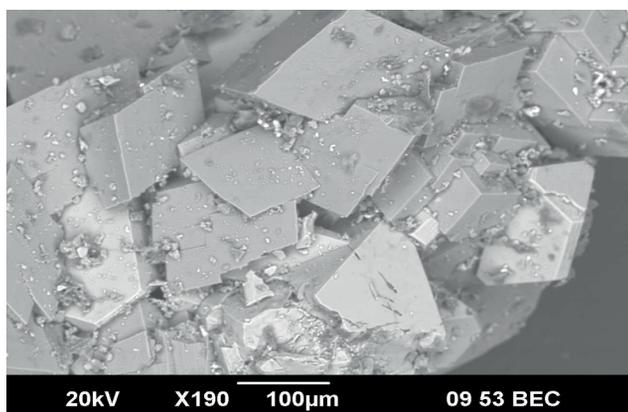
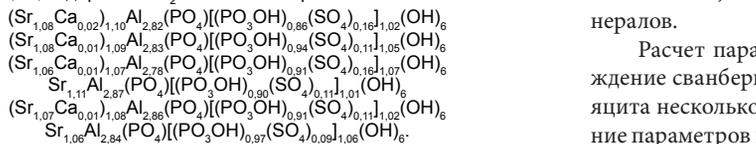


Рисунок 3. Ромбоэдрические кристаллы доломита первого типа нарастают на более светлые кристаллы гояцита. РЭМ-фото в отраженных электронах (прибор JSM-6390LV).

Таблица 1. Химический состав гояцита.

Компонент	1	4	5	6	7	9
SrO	24,19	23,92	23,51	24,86	23,50	23,52
CaO	0,29	0,06	0,09	0,05	0,18	0,05
Al ₂ O ₃	30,98	30,84	30,34	31,48	30,78	30,91
P ₂ O ₅	28,39	29,38	29,08	28,98	28,74	29,90
SO ₃	2,83	1,86	2,81	1,84	1,86	1,47
Σ _{TRлек}	0,06	0,20	0,21	0,06	0,11	0,22
Сумма	86,74	86,26	86,03	87,27	85,17	86,07

Примечание: 1 – MnO – 0,04, FeO – 0,05; 3 – FeO – 0,03; 4 – MnO – 0,02; 6 – FeO – 0,04; содержание H₂O – стехиометрическое:



мас. % и не влияет на формулу минерала. По сравнению с гояцитом Сафьяновского медноколчеданного месторождения в минерале на порядок меньше редких земель, отсутствуют примеси бария и фтора, но более высокое, в среднем в 2,5 раза, содержание сульфат-иона и присутствует примесь кальция [6].

Катионный состав доломита первого типа был определен микронзондовым анализом и показал присутствие наряду с видообразующими катионами (кальцием и магнием) изоморфные примеси (мас. %): FeO 1,7–6,1, среднее из семи определений 3,5, MnO 0,2–2,2/(7) 0,8 (в скобках указано количество измерений) и SrO 0,1–0,6/(3) 0,4. Состав примесей в доломите непостоянный и испытывает колебания. По сравнению с ранее изученным доломитом из сростка с самородным золотом он содержит меньше FeO, MnO, кроме этого, в некоторых участках в нем встречается примесь SrO [8].

Рентгеновское изучение минерала было проведено в рентгеновской лаборатории кафедры минералогии, петрографии и геохимии Уральского государственного горного университета. Первоначально минерал был диагностирован в пределах группы как

сванбергит, лишь в дальнейшем при определении химического состава было установлено, что сульфат-иона в нем достаточно мало и минерал относится к гояциту.

Рентгенограмма гояцита (табл. 2) достаточно хорошо соответствует эталонной. Вместе с тем из табл. 2 видно, что точная диагностика минерала этой группы только на основании дифракционной картины не всегда однозначна и имеет некоторую неопределенность. Это вызвано близостью межплоскостных расстояний одинаковых плоских сеток у разных минералов в группе. Кроме того, это связано с проявлением изоморфизма как в катионной, так и в анионной частях в пределах отдельных минералов.

Расчет параметров элементарной ячейки показал, что включение сванбергитового и крандаллитового минерала в состав гояцита несколько понижает значение обоих параметров. Сравнение параметров гояцита Березовского и Ильменогорского месторождений, где состав не определялся, показывает заметно более низкое значение параметра a_0 . Сравнивая полученное значение параметра a_0 у крандаллита, которое составляет 7,006 Å, можно видеть близость значений. По-видимому, минерал содержит какое-то количество крандаллитового минерала, о чем свидетельствуют сами авторы, рассматривая инфракрасный спектр минерала [2, 4].

В заключение следует отметить, что образование гояцита в доломит-кварцевых жилах Березовского месторождения происходило как в самих жилах в виде хорошо образованных кристаллов, так и в приальбантовых частях жилы в виде маломощных прожилков в березитах. О времени образования можно косвенно судить по взаимоотношениям гояцита с окружающими минералами, которые свидетельствуют о кристаллизации его на заключительных этапах второй, кварц-пиритовой минеральной ассоциации. Локальное и незначительное развитие гояцита в кварц-доломитовых жилах связано, по-видимому, с убогим содержанием стронция во вмещающих вулканогенно-осадочных породах, экстрагированного в результате их проработки гидротермальными растворами.

Таблица 2. Рентгенограмма гояцита.

Березовское месторождение		Ильменогорское месторождение [4]		Гояцит [2]		Горсейксит JCPDS 19-535			
Int	d[Å]	Int	d[Å]	d[Å]	Int	hkl	d[Å]	Int	hkl
7	5,78	6	5,74	5,72	100	101	5,73	90	101
–	–	–	–	4,91	2	102	–	–	–
6	3,53	6	3,42	3,51	90	110	3,52	80	110
4	3,26	4	3,27	3,44	9	111	–	–	–
–	–	1	3,06	–	–	–	–	–	–
10	2,96*	10	2,97*	2,969	100	113	2,978	100	113
2	2,86*	1	2,86*	2,858	13	202	2,855	30	202
2	2,77*	7	2,77*	2,777	16	006	2,775	20	204
3	2,45*	4	2,44*	2,454	14	204	2,449	30	115
–	–	3	2,24	2,277	12	211	2,271	50	211
8	2,21*	10	2,21*	2,215	55	212	2,215	60	212
–	–	2	2,17*	2,180	8	116	–	–	–
–	–	–	–	2,026	6	300	2,021	30	300
1	2,01*	–	–	2,011	10	214	2,013	30	314
–	–	1	1,947	1,969	3	302	–	–	–
5	1,901*	6	1,898*	1,905	45	303	1,905	70	303
5	1,756*	4	1,753*	1,756	40	220	1,756	60	220
–	–	1	1,714	1,717	5	208	–	–	–
–	–	–	–	1,678	4	311	1,675	20	311
–	–	–	–	1,672	2	223	–	–	–
–	–	1	1,649	1,651	7	217	1,651	5	–
2	1,642	2	1,633*	1,636	10	119	–	–	–
–	–	–	–	1,605	3	10,10	–	–	–
–	–	–	–	1,545	1	307	–	–	–
1	1,507*	1	1,501*	1,506	8	315	1,510	10	315
–	–	–	–	1,495	8	402	–	–	–
2	1,482*	2	1,480*	1,484	13	226	1,490	30	–
4	1,459*	5	1,457*	1,461	9	20,10	–	–	–
$a_0 = 7,017 \pm 0,002$		$a_0 = 7,011 \pm 0,003$		$a_0 = 7,021 \pm 0,006$		$a_0 = 7,02$			
$c_0 = 16,61 \pm 0,01$		$c_0 = 16,60 \pm 0,02$		$c_0 = 16,64 \pm 0,02$		$c_0 = 16,87$			

Примечание. Условия съемки: аппарат УРС-55; Feα+β-излучение; камера РКД 57,3 мм; U = 30 кВ, I = 10 мА; * – отражения, по которым рассчитаны параметры элементарной ячейки.

Авторы выражают благодарность Ф. З. Нурмухаметову за предоставленный материал для исследований и А. В. Чикаеву за внимательное отношение к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэна Дж. Д., Дэна Э. С., Пэлач Ч. и др. Система минералогии. М.: ИЛ, 1954. Т. II, полутом 2. С. 246–249.
2. Bayliss P., Kolitsch U., Nickel E. H., Pring A. Alunite supergroup: recommended nomenclature // *Miner. Mag.* 2010. Vol. 74(5). P. 919–927.
3. Лиферович Р. П., Яковенчук В. Н., Пахомовский Я. А., Богданова А. Н. Гояцит из доломитовых карбонатитов Ковдорского массива // *Зап. Всерос. минералогич. о-ва. М.*, 1997. Ч. СХХVI. С. 56–63.
4. Попов В. А., Корнилов Ю. Б. Первая находка гоаяцита в Ильменских горах // *Минералы и парагенезисы минералов месторождений Урала. Свердловск*, 1983. С. 26–28.
5. Рентгартен Н. В. Гояцит в беликовых отложениях восточного склона Урала // *ДАН СССР*. 1948. Т. 60, № 3. С. 429–431.
6. Притчин М. Е., Сорока Е. И., Молошаг В. П. и др. Находки гоаяцита в метасоматитах Сафьяновского медноколчеданного месторождения // *Уральская минералогическая школа-2014. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН*, 2014. С. 211–213.
7. Поленов Ю. А., Огородников В. Н., Бабенко В. В. Березовское золоторудное месторождение кварцево-жильного типа – классический объект полихронного и полигенного генезиса // *Литосфера*. 2013. № 6. С. 39–53.
8. Суставов С. Г., Ханин Д. А., Шагалов Е. С. О находке крокоита в поздних золотоносных кварц-карбонатных жилах Березовского месторождения // *Уральская минералогическая школа-2015. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН*, 2015. С. 99–105.

REFERENCES

1. Dena Dzh. D., Dena E. S., Pelach Ch., Berman G., Frondel' K. 1954, *Sistema*

- mineralogii* [Mineralogy system], Moscow, vol. 2, pp. 246–249.
2. Bayliss P., Kolitsch U., Nickel E. H., Pring A. 2010, Alunite supergroup: recommended nomenclature. *Mineralogical Magazine*, vol. 5(74), pp. 919–927.
3. Liferovich R. P., Yakovenchuk V. N., Pakhomovskiy Ya. A., Bogdanova A. N. 1997, *Goyatsit iz dolomitovykh karbonatitov Kovdorskogo massiva* [Goyazite from dolomitic carbonatites of the Kovdor massif]. *Zapiski Vserossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the All-Russian Mineralogical Society], Moscow, part SXXVI, pp. 56–63.
4. Popov V. A., Kornilov Yu. B. 1983, *Pervaya nakhodka goyatsita v Il'menskikh gorakh* [The first discovery of goyazite in Ilmen mountains]. *Mineraly i paragenезisy mineralov mestorozhdeniy Urala* [Minerals and parageneses of the mineral deposits of the Urals], Sverdlovsk, pp. 26–28.
5. Rentgarten N. V. 1948, *Goyatsit v belikovykh otlozheniyakh vostochnogo sklona Urala* [Goyazite in the Belik sediments of the eastern slope of the Urals]. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], vol. 60, no. 3, pp. 429–431.
6. Pritchinn M. E., Soroka E. I., Moloshag V. P., Zamyatin D. A. 2014, *Nakhodki goyatsita v metasomatitakh Saf'yanovskogo mednokolchedannogo mestorozhdeniya* [Discoveries of goazite in metasomatites of Safyanovsky massive sulfide deposit]. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola-2014* [Ural Mineralogical School 2014], Ekaterinburg, pp. 211–213.
7. Polenov Yu. A., Ogorodnikov V. N., Babenko V. V. 2013, *Berezovskoe zolotorudnoye mestorozhdenie kvartsevo-zhil'nogo tipa – klassicheskiy ob'ekt polikhronnogo i poligennogo genezisa* [Berezovsky gold deposit of quartz-vein type – classical object of polychronous and polygenic genesis]. *Litosfera* [Litosfera], no. 6, pp. 39–53.
8. Sustavov S. G., Khanin D. A., Shagalov E. S. 2015, *O nakhodke krokoita v pozdnykh zolotonosnykh kvarts-karbonatnykh zhilakh Berezovskogo mestorozhdeniya* [On the discovery of crocoite in late auriferous quartz-carbonate veins of Berezovsky deposit]. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola-2015* [Ural Mineralogical School 2015], Ekaterinburg, pp. 99–105.

Сергей Геннадьевич Суставов,
sustavov.s@ursmu.ru
Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Sergey Gennad'evich Sustavov,
sustavov.s@ursmu.ru
Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia

Евгений Сергеевич Шагалов,
shagalov@igg.uran.ru
Институт геологии и геохимии им. Акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН

Evgeniy Sergeevich Shagalov,
shagalov@igg.uran.ru
The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS

Дмитрий Александрович Ханин,
mamontenok49@yandex.ru
Институт экспериментальной минералогии РАН
Россия, Московская обл., Черноголовка, ул. Акад. Осипьяна, 4

Dmitriy Aleksandrovich Khanin,
mamontenok49@yandex.ru
Institute of Experimental Mineralogy RAS
Chernogolovka, Noginsk district, Moscow region, Russia